

Aleksi Alamattila

AURINKOSÄHKÖJÄRJESTELMIEN OPTIMOINTI SÄHKÖMARKKINOILLA

AURINKOSÄHKÖJÄRJESTELMIEN OPTIMOINTI SÄHKÖMARKKINOILLA

Aleksi Alamattila
Opinnäytetyö
Kevät 2018
Energiatekniikan tutkinto-ohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Energiatekniikan tutkinto-ohjelma

Tekijä: Aleksi Alamattila

Opinnäytetyön nimi: Aurinkosähköjärjestelmien optimointi sähkömarkkinoilla

Työn ohjaaja: Veli-Matti Mäkelä

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Kevät 2018

Sivumäärä: 56 + 2 liitettä

Tämä opinnäytetyö on tehty Oulun Sähkönmyynti Oy:lle. Tarkoituksena oli selvittää sähkön markkinahinnan vaikutus aurinkosähköjärjestelmien optimoinnissa. Opinnäytetyönä tuli tehdä Excel-laskuri, jolla voitiin vertailla eri asennuskulmilla toteutettujen aurinkosähköjärjestelmien tuotetun sähkön määrää ja arvoa.

Excel-laskurin täytyi laskea tuotetun sähkön määrä vuoden jokaiselle tunnille ja kertoa se kolmen edellisen vuoden sähkön markkinahinnan keskiarvolla. Tuloksesta tehtiin matriisi, jotta summat olivat helposti vertailtavassa muodossa. Myös tuotetuista energioista tehtiin matriisi, jotta voitiin vertailla optimointia määrän ja sähkön markkinahinnan perusteella.

Tehtyjen matriisien perusteella asennusilmansuuntana lounas tuottaa enemmän sähköä kuin kaakko, mutta aamupäivän korkeammat sähkön markkinahinnat tasoituttavat rahalliset hyödyt melkein samoiksi. Myös länteen suunnatun paneelientodettiin tuottavan enemmän sähköä kuin itään suunnatun, mutta rahalliset hyödyt energioista ovat hyvin lähellä toisiaan, koska Suomen aluehinta on korkeampi ennen keskipäivää kuin sen jälkeen. Kaiken kaikkiaan aurinkosähköjärjestelmien todistettiin tuottavan sähköä korkean markkinahinnan aikaan, kun vertailtiin kolmen vuoden markkinahintojen keskiarvoja tuntitasolla.

Suomen aluehinta on hyvin epävakaa. Tiettyä huomattavan kallista tuntia vuorokausista ei löydetty kolmen vuoden markkinahintojen perusteella. Jos Suomen aluehinta vakaantuu esimerkiksi ydinvoimalaitosten vaikutuksesta, tulee tarkastelu aurinkosähköjärjestelmien optimoinnista sähkön markkinahinnan mukaan tehdä uudestaan. Jos vuorokausissa olisi tietty kallis Suomen aluehinta toistuvasti, voi optimointi sähkön markkinahinnan perusteella poiketa merkittävästi verrattuna optimointiin tuotetun energian perusteella.

Asiasanat: aurinkoenergia, kestävä kehitys, sähkömarkkinat

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
SISÄLLYS	4
SANASTO	6
1 JOHDANTO	8
2 OULUN SÄHKÖNMYynti OY	9
3 AURINKO VALON JA LÄMMÖN LÄHTEENÄ	10
3.1 Maan pinnalle tulevaan säteilyyn vaikuttavat tekijät	10
3.2 Sähköä auringon valosta	11
4 AURINKOSÄHKÖJÄRJESTELMIEN PÄÄLAITTEET	12
4.1 Aurinkopaneelit	12
4.2 Invertterit	14
5 AURINKOSÄHKÖJÄRJESTELMIEN ENERGIOIDEN LASKENTA	15
5.1 Auringon säteilyn laskeminen paneelien pinnalle	15
5.2 Säteilystä saatava sähkö	30
5.3 Sähkön arvo	35
6 SÄHKÖMARKKINAT	37
6.1 Sähkön hinnan muodostuminen markkinoilla	37
6.2 Eri vuosien sähkön markkinahinnan vertailua	38
6.3 Sähkömarkkinoiden tulevaisuus	40
7 AURINKOSÄHKÖJÄRJESTELMIEN OPTIMOINTI SÄHKÖMARKKINOILLA	41
7.1 Pientuottajien hyödyn maksimointi	41
7.2 Aurinkosähköä sähkömarkkinoille parhaalla hyödyllä	42
8 JOHTOPÄÄTÖKSET	51
9 YHTEENVETO	53
LÄHTEET	54
LIITTEET	
Liite 1 Megawatin aurinkosähköjärjestelmän vuodessa tuottama sähkö eri asennuskulmilla	

Liite 2 Megawatin aurinkosähköjärjestelmän vuodessa tuottaman sähkön arvo
eri asennuskulmilla

SANASTO

α	korkeuskulma [°]
AM	ilmamassa
β	kallistuskulma [°]
γ	atsimuuttikulma [°]
γ_s	aurion atsimuuttikulma [°]
G	säteily [W/m ²]
G _{sc}	aurinkovakio [W/m ²]
D	päivän järjestysluku vuoden alusta laskien
δ	maapallon akselin kaltevuus [°]
E	energia [Wh]
E ₀	eksentrisyys korjauskerroin
ET	ajankorjaus [min]
η	hyötysuhde
θ	tulokulma [°]
θ_z	zeniittikulma [°]
φ	leveyspiiri [°]
I	virta [A]
I	säteilyn voimakkuus [W/m ²]
I _{sc}	oikosulkuvirta [V]

K_t	kirkkausindeksi
L	pituuspiiri [°]
LT	paikallinen standardiaika
MPP	maksimitehopiste
n	määrä
$NOCT$	normaalitoimintalämpötila [°C]
P	teho [W]
ST	aurinkoaika [hh.mm]
T	lämpötila [°C]
t	aika [h]
U	jännite [V]
U_{oc}	tyhjäkäyntijännite [V]
ρ	heijastussuhde
ω	tuntikulma [°]

1 JOHDANTO

EU on asettanut ilmastotavoitteet itselleen liittyen hiilidioksidipäästöihin, energia-
tehokkuuteen ja uusiutuvien energialähteiden käyttöön vuosille 2020, 2030 ja
2050. Vuoteen 2020 mennessä hiilidioksidipäästöjä on tavoite vähentää 20 %
vuoteen 1990 verrattuna, ja vuoteen 2030 mennessä vastaava tavoite on 40 %.
Tavoitteena vuodelle 2020 on saada uusiutuvien energialähteiden osuus ener-
gian kokonaiskulutuksesta 20 %:iin ja vuodelle 2030 vastaava tavoite on 27 %.
(1.)

Vertailtaessa uusiutuvien energianlähteiden kasvua Euroopan sähköntuotan-
nossa aurinkoenergian kasvu on ollut erittäin nopeaa viimeisen kymmenen vuo-
den aikana. Aurinkoenergialla vuodessa tuotetun sähkön määrä Euroopassa
kasvoi vuoden 2006 arvosta 2,5 TWh vuoden 2016 arvoon 110,8 TWh. Toisin
sanoen aurinkoenergialla tuotetun sähkön osuus kasvoi 0,3 prosentista 11,6 pro-
sentiin uusiutuvilla energianlähteillä tuotetusta sähköstä kymmenen vuoden ai-
kana. (2.) Suomessa verkkoon kytkettyjen aurinkosähköjärjestelmien tuotantoka-
pasiiteetti oli vuoden 2017 tietojen mukaan 27 MW kun vuonna 2015 kapasiteetti
oli noin 8 MW (3).

Aurinkopaneelit muuttavat valoa tasasähköksi, joka voidaan muuntaa invertterien
avulla vaihtosähköksi. Ajankohta jolloin aurinkosähköjärjestelmä tuottaa sähkön,
riippuu suuresti asennuskulmasta ja ilmansuunnasta mihin paneelikenttä on
suunnattu. Toisaalta myös sähkön pörssihinta (Suomen aluehinta) vaihtelee suu-
resti vuoden aikana kysynnän ja tuotannon mukaan. Aurinkosähköstä on tehty
useita tutkimuksia ottamatta kuitenkaan kantaa tuotetun sähkön arvoon. Tämän
opinnäytetyön tavoitteena on tehdä laskuri, jolla voidaan optimoida aurinkosäh-
köjärjestelmiä markkinahinnan mukaan eli selvittää, millä asennuskulmalla ja mi-
hin ilmansuuntaan paneelikenttiä tulisi asentaa, jotta sähköntuottajat saavat suu-
rimman mahdollisen rahallisen hyödyn järjestelmistään. Vaikka paneelien tuo-
tanto laskee, voi hyöty kasvaa, jos järjestelmä tuottaa markkinahinnaltaan arvok-
kaampaa sähköä. Työn tilaaja on Oulun Sähkönmyynti Oy.

2 OULUN SÄHKÖNMYynti Oy

Opinnäytetyön toimeksiantaja on Oulun Sähkönmyynti Oy, joka on Oulun Energian tytäryhtiö ja vastaa muun muassa konsernin sähkönmyyntiliiketoiminnasta ja asiakaspalvelusta. Oulun sähkönmyynnillä on myös seitsemän muuta omistajaa, joilla on yhteinen Pohjoista voimaa -brändi.

Oulun Energia Oy on tulevaisuuden energiayhtiö, joka on lähtenyt vahvasti mukaan muuttuville energiamarkkinoille tarjoamalla asiakkaille sähkön ja lämmön lisäksi useita energiatehokkuuteen liittyviä ratkaisuja. Kuvassa 1 on Toppilan voimalaitoksen seinään rakennettu aurinkosähköjärjestelmä, jossa on 827 aurinkopaneelia ja jonka nimellisteho on noin 270 kWp (4).



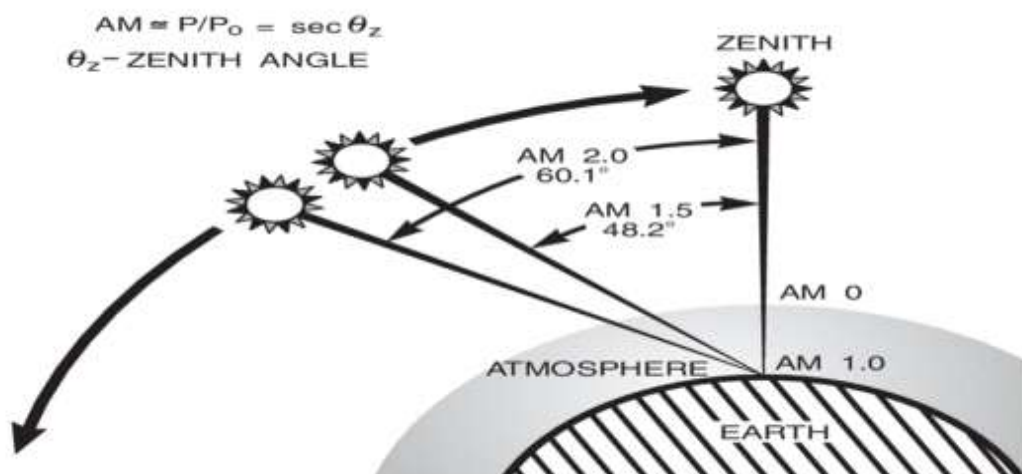
KUVA 1 Toppilan voimalaitoksen aurinkoseinä (4)

3 AURINKO VALON JA LÄMMÖN LÄHTEENÄ

Aurinko on tähti, jonka ytimessä tapahtuu vedyn fuusioreaktio ja syntyy heliumia. Kun vety fuusioituu heilumiksi, jää näiden ytimille massaero, joka muuttuu energiaksi Einsteinin suhteellisuusteorian perusteella. Energia siirtyy maapallolle sähkömagneettisena säteilynä, suurimmaksi osaksi näkyvänä valona ja infrapunasäteilynä. Auringon kokonaisteho on noin $3,8 \cdot 10^{23}$ kW, ja tästä tulee maapallolle noin $1,7 \cdot 10^{14}$ kilowattia (5, s. 12).

3.1 Maan pinnalle tulevaan säteilyyn vaikuttavat tekijät

Auringon säteily voidaan jakaa suoraan säteilyyn, hajasäteilyyn ja ilmakehän vastasäteilyyn eli heijastuneeseen säteilyyn. Ilmakehän kaasumolekyylit, vesihöyry ja epäpuhtaudet estävät auringon säteilyn pääsyä maan pinnalle, joten suuri vaikutus maan pinnalle tulevaan säteilyyn on auringon korkeudella ja pilvisyydellä. Auringon korkeus vaikuttaa säteiden läpäistävän ilmakehän paksuuteen, ja tästä syystä auringon paistaessa matalalta säteily on huomattavasti vähäisempää kuin silloin, kun aurinko paistaa korkealta (5, s. 13 - 14). Kuvassa 2 on havainnollistettu auringon korkeuden vaikutusta säteilyä heikentävän ilmamassan paksuuteen.

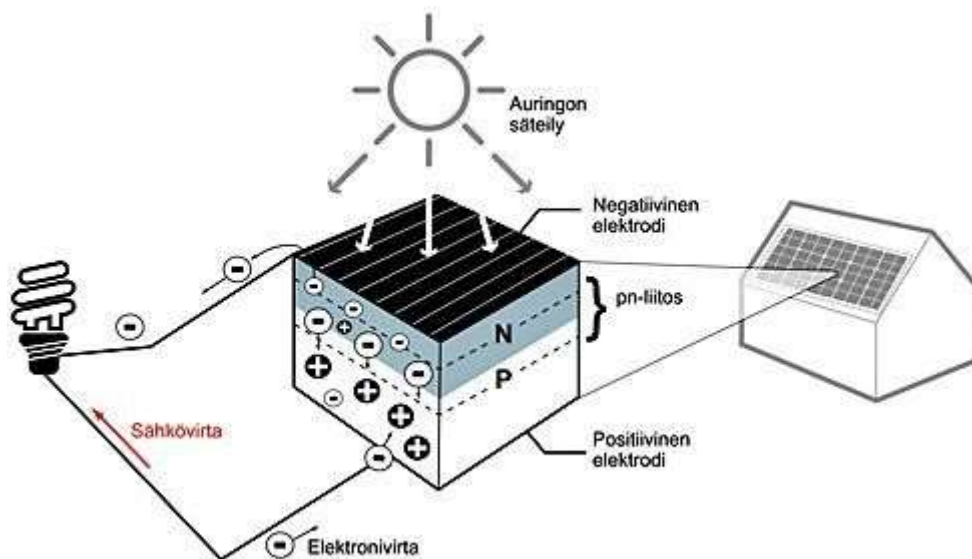


KUVA 2 Auringon korkeuden vaikutus ilmamassan paksuuteen (6)

Talvella pilvisyys on Suomessa suurimmillaan ja aurinko paistaa matalalta, joten lumen vaikutuksesta menetetty säteily paneelien pinnalla on vähäistä. Lumen vaikutusta aurinkosähköjärjestelmien tuotantoon käsitellään myöhemmin lisää.

3.2 Sähköä auringon valosta

Auringon valon muuttaminen sähköksi perustuu valosähköiseen ilmiöön. Puoli-johteet muodostavat PN-rajapinnan, johon auringon säteily synnyttää elektroni-aukko-pareja. Kun puolijohdeaineet yhdistetään ulkoisella virtapiirillä, elektronit virtaavat N-puoli-johteesta P-puoli-johteen aukkoihin. Yhdistyneiden parien tilalle auringon säteily muodostaa uusia aukkoja ja näin ylläpitää virtaa ulkoisessa piirissä. (7, s. 295.) Elektronit ovat näin ollen ainoita liikkuvia osia aurinkopaneelissa. Kuva 3 on aurinkokennon PN-liitoksen periaatekuva.



KUVA 3 Aurinkokennon PN-liitoksen periaatekuva (8)

4 AURINKOSÄHKÖJÄRJESTELMIEN PÄÄLAITTEET

Aurinkosähköjärjestelmät muodostuvat paneeleista, vaihtosuuntaajista, pientarvikkeista ja mahdollisesta akustosta (5, s. 136). Verkkoon kytkettävät invertterit sisältävät yleensä yhden tai useamman maksimitehopistesäätimen eli MPP-säätimen.

4.1 Aurinkopaneelit

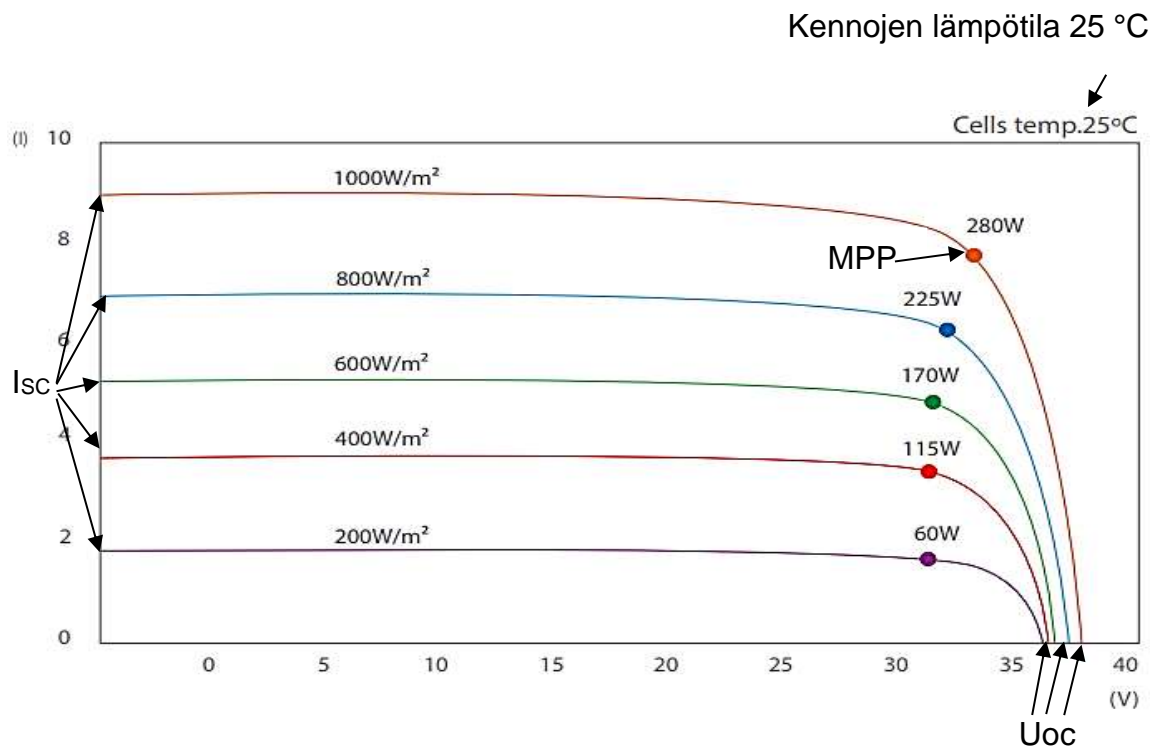
Aurinkopaneeleissa on sarjaan kytkettyjä kennoja, jotka valmistetaan pääsääntöisesti monikiteisestä tai yksikiteisestä piistä. Tässä opinnäytetyössä ei käydä tarkemmin tekniikoita vaan perehdytään monikide- ja yksikidepiitekniikoihin, koska ne ovat markkinoilla yleisimmät.

Paneelien hyötysuhteisiin vaikuttavat teknologia, säteilyn määrä ja kennojen lämpötila. Tästä syystä paneelien toiminnan kannalta on tärkeää osata lukea niiden ominaiskäyriä. Aurinkopaneeleiden esitteissä olevista ominaiskäyristä voidaan lukea muun muassa tyhjäkäyntijännite, oikosulkuvirta ja maksimitehopiste. Tyhjäkäyntijännite U_{OC} tarkoittaa nimensä mukaisesti paneelin jännitettä, kun kuormaa ei ole kytketty. Tyhjäkäyntijännite on siis suurin paneelin saavuttama jännite 25 °C:n lämpötilassa. Oikosulkuvirta I_{SC} on virta napojen ollessa oikosulussa. Ominaiskäyrän tärkein piste on toimintapiste MPP, joka on teho kyseisen kohdan virralla ja jännitteellä. (7, s. 297.)

Paneelien ominaiskäyrät ilmoitetaan yleensä standarditestiolosuhteissa (STC), ja tällöin nimellistehon yksikkö on wattipiikki (W_p). Standarditestiolosuhteissa säteilyn teho on 1 000 W/m², kennojen lämpötila 25 °C ja Air mass (AM) 1,5. Mainittu ilmassa vastaa tilannetta, jossa säteily suodattuu ilmakehässä 1,5 kertaa ilmakehänpaksuuden verrattuna säteilyyn lakipisteestä. (7, s. 296.)

Toinen mahdollinen olosuhde ilmoittaa aurinkopaneelin nimellisarvot ovat NOCT-olosuhteet (Normal Operating Cell Temperature). Normaalityöintälämpötila on

yleensä 42–48 °C, ja se mitataan telineeseen kiinnitetystä paneelistä. Mittaus-
hetkellä kallistuskulma on 45°, ilmanlämpötila 20 °C, tuulen nopeus 1 m/s, säteily-
teho 800 W/m², AM 1,5 ja paneelia ei kuormiteta. (7, s. 300.) Kuvassa 4 on
geneerisen 280 Wp -monikidepaneelin ominaiskäyrä STC-olosuhteissa.



KUVA 4 geneerisen 280 Wp -monikidepaneelin ominaiskäyrä STC-olosuhteissa

Lämpötilan ja säteilyn vaikutus hyötysuhteeseen voidaan lukea taulukosta 1. Lämpötilan nousu kasvattaa virtaa, mutta laskee jännitettä, ja teho laskee. Taulukossa 1 on esitetty teknisiä tietoja geneerisestä 280 Wp -monikidepaneelistä, ja myöhemmin laskennassa otetaan huomioon lämpötilan ja säteilyn vaikutus hyötysuhteeseen.

TAULUKKO 1 Teknisiä tietoja geneerisestä 280 Wp -monikidepaneelistä

Isc	9,25 A
Uoc	39,10 V
Imp	8,85 A
Ump	31,65 V
Isc	0,075 %/°C
Uoc	- 0,312 %/°C
Pmax	- 0,41 %/°C
NOCT	44°C ± 2°C

4.2 Invertterit

Aurinkopaneelit tuottavat tasavirtaa, ja invertterit eli vaihtosuuntaajat muuntavat sitä vaihtovirraksi. Yleisin Suomen markkinoilla käytetty invertteriteknologia on ketjuinvertteri. Mainitussa teknologiassa paneelien ketjutuksella invertterien lataussäätimiin on hyvin suuri merkitys aurinkosähköjärjestelmien toimintaan. Samaa ketjuun kytkettyjen paneelien voidaan kuvitella toimivan yhtenä kokonaisuutena, joten sarjaan kytkettyjen paneelien tulee olla hyvin samoissa olosuhteissa varjostusten ja säteilyn suhteen.

Myös rinnan kytkettyjen ketjujen tulee olla identtisiä samassa lataussäätimessä. Lisäksi sarjaan kytkettyjen paneelien käyntijännite tulee olla invertterin ilmoittaman maksipisteen jännitealueella, ja tyhjäkäyntijännitteen tulee ylittää invertterin käynnistysjännite. Jos järjestelmä on toteutettu asentamalla yksittäisiä lataussäätimiä paneeleihin, ne hakevat yksilönä maksimipistettä eli toimintapisteen jännitettä ja virtaa. Tässä opinnäytetyössä aurinkosähköjärjestelmien tuotantoa lasketaan oikeaoppisella ketjutuksella eikä oteta kantaa suunnitteluvirheisiin. Ketjutuksen suunnittelusta on tehty useita opinnäytetöitä ja oppaita.

5 AURINKOSÄHKÖJÄRJESTELMIEN ENERGIOIDEN LASKENTA

Opinnäytetyönä tehtiin Excel-laskuri aurinkosähköjärjestelmien optimointiin sähkön markkinahinnalla. Tuotetun sähkön määrä ja arvo piti laskea erikseen vuoden jokaiselle tunnille, koska optimointiin käytetty sähkön markkinahinta vaihtuu tunnin välein. Kun laskuriin asetettiin asennusilmansuunta, kallistuskulma, paneeleiden määrä ja järjestelmän kokonaishyötysuhde, laskuri ilmoitti tuotetun sähkön arvon ja määrän. Arvoja laskettiin kyseisellä tavalla riittävä määrä ja asetettiin matriisiin, jotta tulokset olivat helposti luettavassa muodossa.

Excel-laskuria voidaan käyttää myös aurinkosähköjärjestelmän tuotannon arvioimiseen tuntitasolla. Tuntitasolla tuotannon tarkasteleminen on tarpeellista, kun tiedetään kulutusprofiilit ja halutaan arvioida ylijäämäsähkön määrä tietyn tehoisella järjestelmällä. Ylijäämäsähköstä saatava hyöty on vähäisempää, koska sähkön kokonaiskustannus sisältää siirtomaksun ja veroja.

5.1 Auringon säteilyn laskeminen paneelien pinnalle

Aurinkosähköjärjestelmän tuotantoon vaikuttavat paneelien pintaan tuleva säteily, paneeleiden määrä ja järjestelmän kokonaishyötysuhde. Auringon säteilyn laskemiseen kallistetulle paneelin pinnalle liittyy useita kulmia, joista esimerkkinä voidaan mainita paneelin kallistuskulma ja atsimuuttikulma eli asennusilmansuunta. Auringon säteilyyn liittyvät kulmat laskettiin paikallista aikaa aina tunnin puoliväliin, koska sähkön markkinahinta vaihtuu tasatunnein. Todellisuudessa säteilyyn liittyvät kulmat muuttuvat joka hetki, ja tästä syystä tunnin puoliväli oli soveltuvin hetki laskea kulmat. Globaalisäteily saatiin Ilmatieteenlaitoksen Oulun Vihreäsaaren sataman sääasemasta tuntien puoliväliin, ja se purettiin suoraan ja hajasäteilyyn. Säteilyn määrästä laskettiin saatu sähköteho, ja kerrottiin yhdellä tunnilla. Tällä tavalla saatiin riittävän tarkasti laskettua tuotetun energian määrä tietyn sähkön markkinahinnan aikana.

Maa kiertää auringon ympäri hieman yli 365 päivässä, ja tästä syystä vietetään karkauspäivää kerran neljässä vuodessa. Lisäksi maan kulkema rata on hieman ellipsi, ja kulmanopeus auringon ympäri vaihtelee, joten vuoden jokaiselle päivälle tulee laskea ajantasausta käyttäen kaavoja 1 ja 2. (9.)

$$ET = 9,87 \times \sin(2B) - 7,53 \times \cos(B) - 1,5 \times \sin(B) \quad \text{KAAVA 1}$$

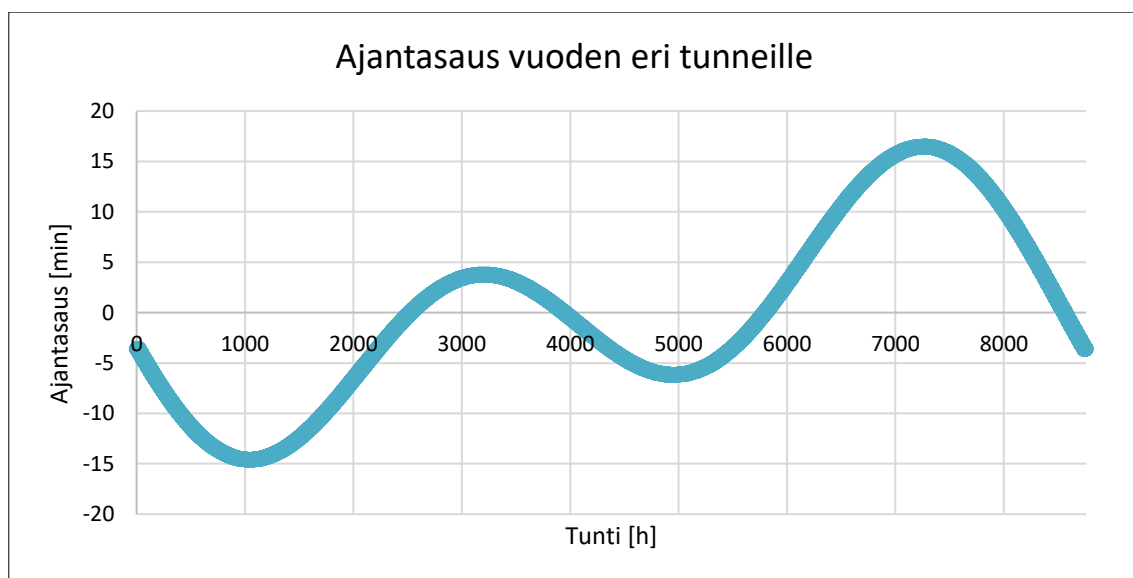
$$B = 360 \times \frac{D-81}{364} \quad \text{KAAVA 2}$$

jossa,

ET = ajantasausta [min]

D = päivän järjestysluku vuoden alusta laskien

Kuvassa 5 on ajantasausta vuoden jokaiselle tunnille.



KUVA 5 Ajantasausta vuoden tunneille

Ajantasausta laskettiin heinäkuun ensimmäiselle päivälle kaavojen 1 ja 2 avulla.

$$B = 360 \times \frac{182 - 81}{364} \approx 99,89$$

$$ET = 9,87 \times \sin(2 \times 99,89) - 7,53 \times \cos(99,89) - 1,5 \times \sin(99,89) = -3,52 \text{ min}$$

Laskettaville järjestelmille piti määrittää sijainti leveys- ja pituuspiirin avulla. Sijaintina käytettiin sääaseman koordinaatteja eli Oulua. Leveyspiirin nollakohta on päiväntasaaja. Pohjoiseen päin poiketessa leveyspiirit ovat positiivisia ja vastavasti etelään päin mentäessä ne ovat negatiivisia. Nollapituuspiiri sijaitsee Englannissa Greenwichissä. Pituuspiirit ovat positiivisia nollakohdasta itään päin ja negatiivisia länteen päin. Suomen kaupunkien koordinaatit voi hakea Metsähallituksen ylläpitäältä nettisivulta osoitteesta [\(https://www.retkikartta.fi/.\(2\)\)](https://www.retkikartta.fi/.(2)) (10). Oulun sijainti koordinaatteina on 65 astetta pohjoista leveyttä ja 25 astetta itäistä pituutta.

Auringolla kuluu neljä minuuttia yhden asteen siirtymiseen pituuspiirillä. Aikavyöhykekartassa koko kierros eli 360 astetta on jaettu 24 aikavyöhykkeeseen. Toisin sanoen yksi tunti eli 60 minuuttia vastaa 15:tä astetta, ja tätä havainnollistetaan kuvassa 6.



KUVA 6 Aikavyöhykkeet maailman kartalla (11)

Kun tiedetään ajantasaus, paikallinen pituuspiiri, aikavyöhykkeen keskiajan pituuspiiri ja paikallinen kellonaika, saadaan aurinkoaika laskettu kaavalla 3 (9).

$$ST = LT + ET \pm 4 \times (L_{st} - L_{loc}) - DS \quad \text{KAAVA 3}$$

jossa,

ST = aurinkoaika [hh.mm]

LT = paikallinen standardiaika [hh.mm]

ET = ajantasaus [min]

L_{st} = aikavyöhykkeen keskiajan pituuspiiri [°] (Suomelle +30°)

L_{loc} = paikallinen pituuspiiri [°] (Suomessa välillä +19.00°E ja +32.00°E)

DS = kesäajan huomiointi [min] (Suomessa maaliskuun ja lokakuun viimeisten sunnuntaiden välisenä aikana käytetään 60 minuuttia, muuna aikana käytetään nollaa)

Jos sijainti on itään Greenwichistä, ajantasauksen jälkeinen merkki on miinus (-), ja jos länteen, kyseinen merkki on plus (+).

Aurinkoaika Oulussa 1.7.2018 paikallista aikaa 12.30 laskettiin kaavalla 3.

$$ST = 12.30 + (-3,52 \text{ min}) - 4 \times (30^\circ - 25^\circ) - 60 \text{ min} = 12.30 + (-1.24) = 11.06$$

Maapallon akseli ei ole pystysuorassa, vaan akselin kaltevuus on aina välillä $\pm 23,45^\circ$ saavuttaen ääriarvonsa kesä- ja talvipäivänseisauksina. Akselin kaltevuus on maan ja auringon vaakasuorien lävistäjien väliin jäävä kulma. Maapallon akselin kaltevuus lasketaan kaavalla 4, joten kulmaan vaikuttaa ainoastaan päivän järjestysluku vuoden alusta laskien. (9.)

$$\delta = 23,45 \times \sin\left(360 \times \frac{D+284}{365}\right) \quad \text{KAAVA 4}$$

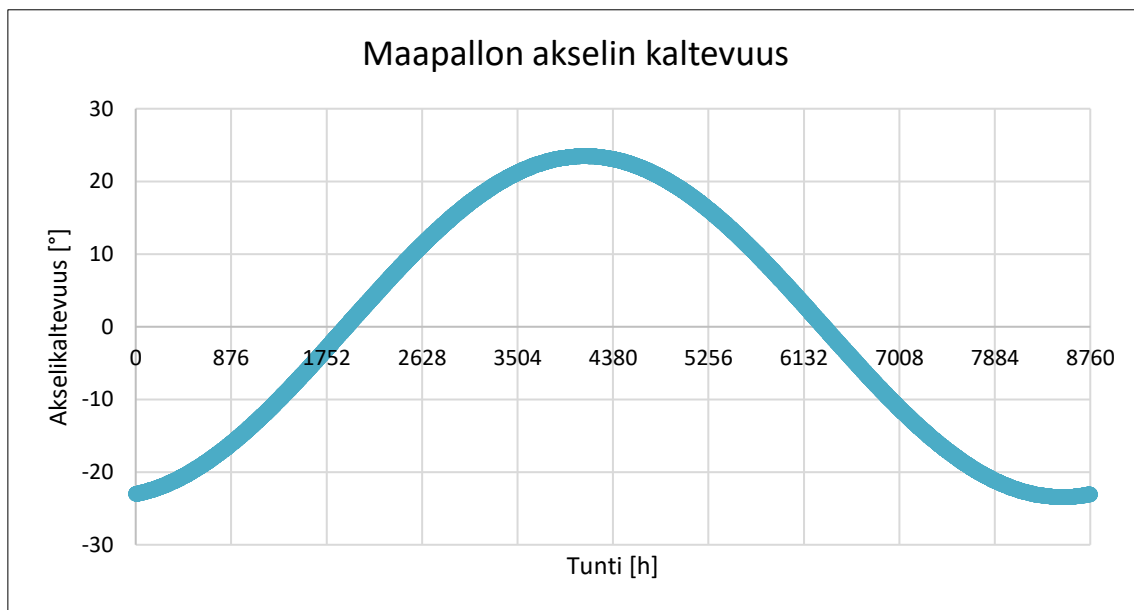
jossa,

δ = maapallon akselin kaltevuus [°]

Maapallon akselin kaltevuus heinäkuun ensimmäiselle päivälle laskettiin kaavalla 4.

$$\delta = 23,45 \times \sin\left(360 \times \frac{182 + 284}{365}\right) = 23,1^\circ$$

Kuvassa 7 on esitetty maapallon akselin kaltevuus ajan funktiona vuoden jokaiselle tunnille.



KUVA 7 Maapallon akselin kaltevuuden vaihtelu vuodessa

Auringon tuntikulma kuvaa auringon sijaintia kulkureitillään. Tuntikulma 0° vastaa tilannetta, jolloin aurinko sijaitsee lakipisteessään. Kun tuntikulma on yli -90° ja alle 90° , kohteessa on päivä ja muulloin on yö. Maapallolla kestää pyörähdysen akselinsa ympäri 24 tuntia, joten maan pyörimisnopeus on 15 astetta tunnissa. Tuntikulma lasketaan kaavalla 5 aurinkoaikan avulla. (9.)

$$\omega = 15^\circ(ST - 12)$$

KAAVA 5

jossa,

ST = Aurinkoaika [h] (esimerkiksi 12.30 = 12,5 h)

Tuntikulma Oulussa 1.7.2018 aurinkoaikaan 11.06 laskettiin kaavan 5 mukaisesti.

$$\omega = 15^\circ(11.06 - 12.00) = 15^\circ \times (-0.94) = 15^\circ \times (-0.9 \text{ h}) = -13.5^\circ$$

Auringon korkeuskulma on suorien säteiden ja vaakasuoran pinnan väliin jäävä kulma. Korkeusaseman laskemiseen tarvitaan leveyspiiri, maapallon akselin kaltevuus ja tuntikulma. Auringon korkeuskulma lasketaan kaavalla 6. (9.)

$$\sin \alpha = \sin \varphi \times \sin \delta + \cos \varphi \times \cos \delta \times \cos \omega$$

KAAVA 6

jossa,

α = auringon korkeuskulma [°]

φ = leveyspiiri [°]

δ = maapallon akselin kaltevuus [°]

ω = tuntikulma [°]

Auringon korkeuskulma 1.7.2018 Oulussa paikallista aikaa 12.30 laskettiin kaavalla 6.

$$\alpha = \sin^{-1}(\sin \varphi \times \sin \delta + \cos \varphi \times \cos \delta \times \cos \omega) = \sin^{-1}(\sin 65^\circ \times \sin 23.1^\circ + \cos 65^\circ \times \cos 23.1^\circ \times \cos -13.5^\circ) = 47.2^\circ$$

Zeniittikulma on suorien säteiden ja pystysuoran viivan välinen kulma, ja se saadaan laskettua kaavalla 7 (9).

$$\theta_z = 90^\circ - \alpha$$

KAAVA 7

jossa,

θ_z = zeniittikulma [°]

α = auringon korkeuskulma [°]

Auringon zenittikulma 1.7.2018 Oulussa paikallista aikaa 12.30 laskettiin kaavalla 7.

$$\theta_z = 90^\circ - 47,2^\circ = 42,8^\circ$$

Pohjoisella pallonpuoliskolla auringon atsimuuttikulma on suorien auringonsäteiden ja etelän välinen kulma vaakasuoralla pinnalla. Eteläisellä pallonpuoliskolla kulma on suorien säteiden ja pohjoisen välissä vaakapinnalla. Auringon atsimuuttikulma lasketaan kaavalla 8. (9.)

$$\sin \gamma_s = \frac{\cos \delta \times \sin \omega}{\cos \alpha} \quad \text{KAAVA 8}$$

jossa,

γ_s = auringon atsimuuttikulma [°]

α = auringon korkeuskulma [°]

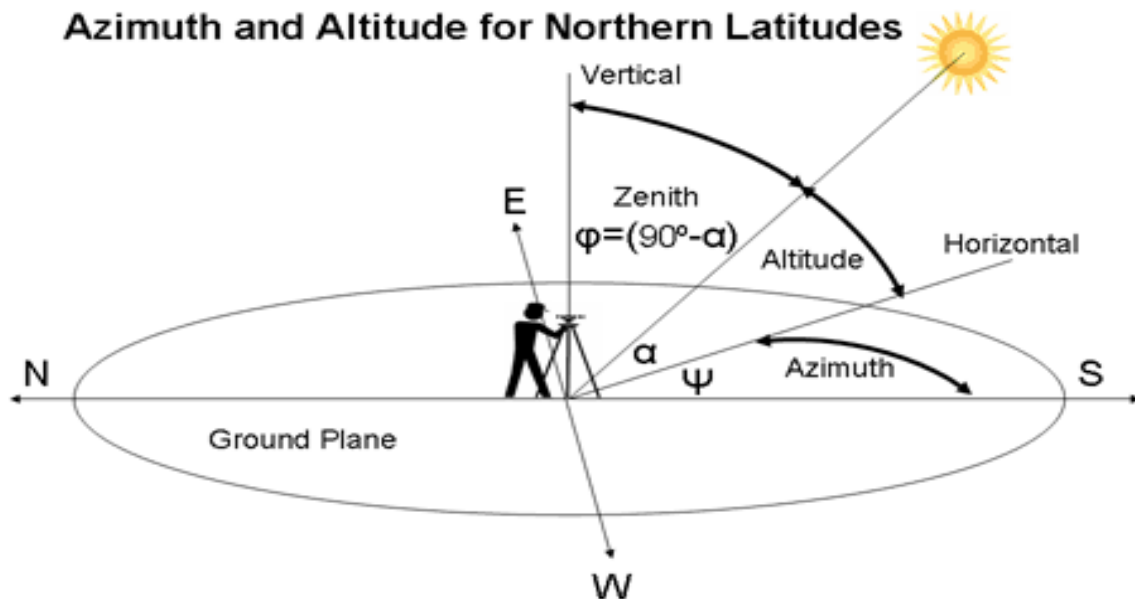
δ = maapallon akselin kaltevuus [°]

ω = tuntikulma [°]

Auringon atsimuuttikulma 1.7.2018 Oulussa paikallista aikaa 12.30 laskettiin kaavalla 8.

$$\gamma_s = \sin^{-1} \left(\frac{\cos 23,1^\circ \times \sin -13,5^\circ}{\cos 47,2^\circ} \right) = -18,4^\circ$$

Kuvassa 8 on havainnollistettu atsimuuttikulmaa, korkeuskulmaa ja zenittikulmaa. Auringon atsimuuttikulma on eri asia kuin atsimuuttikulma, ja näiden ero tarkennetaan seuraavassa kappaleessa.



KUVA 8 Korkeuskulma (altitude), atsimuuttikulma ja zeniittikulma (12)

Atsimuuttikulma on asennusilmansuunnan ja etelän välinen kulma vaakasuoralla tasolla (vertaa auringon atsimuuttikulma). Itään suunnatun paneelikentän atsimuutti on -90° kun taas länteen kohdistetun kentän atsimuuttikulma on $+90^\circ$. Paneelin kallistuskulmalla tarkoitetaan vaakasuoran pinnan ja paneelin välistä kulmaa, ja tulokulma muodostuu auringon suorien säteiden ja paneelin pinnan normaalin väliin. Tulokulma voidaan laskea kallistuksen, zeniitin ja atsimuutin avulla kaavalla 9. (9.) Kun tulokulma on yli 90 astetta, aurinko säteilee paneelikentän takaa, ja tällöin laskurissa säteily merkittiin nolllaksi. Myös hajasäteily on vähäistä, kun aurinko on kokonaan paneelikentän pinnan takana. Mitä jyrkemmässä kulmassa paneelit ovat, sitä lyhyempi on aika, jolloin aurinko on paneelikentän etupuolella. Tästä syystä, kun kallistuskulma jyrkentyy, asennusilmansuunnan vaikutus korostuu.

$$\cos \theta = \cos \beta \times \cos \theta_z + \sin \beta \times \sin \theta_z \times \cos(\gamma_s - \gamma)$$

KAAVA 9

jossa,

θ = tulokulma [°]

θ_z = zeniittikulma [°]

β = kallistuskulma [°]

γ_s = auringon atsimuuttikulma [°]

γ = atsimuuttikulma [°]

Etelään suunnatun, 40 asteen kallistuksella rakennetun paneelikentän tulokulma 1.7.2018 Oulussa paikallista aikaa 12.30 laskettiin kaavalla 9.

$$\theta = \cos^{-1}(\cos 40^\circ \times \cos 42,8^\circ + \sin 40^\circ \times \sin 42,8^\circ \times \cos(-18,4^\circ - (0^\circ))) = 12,5^\circ$$

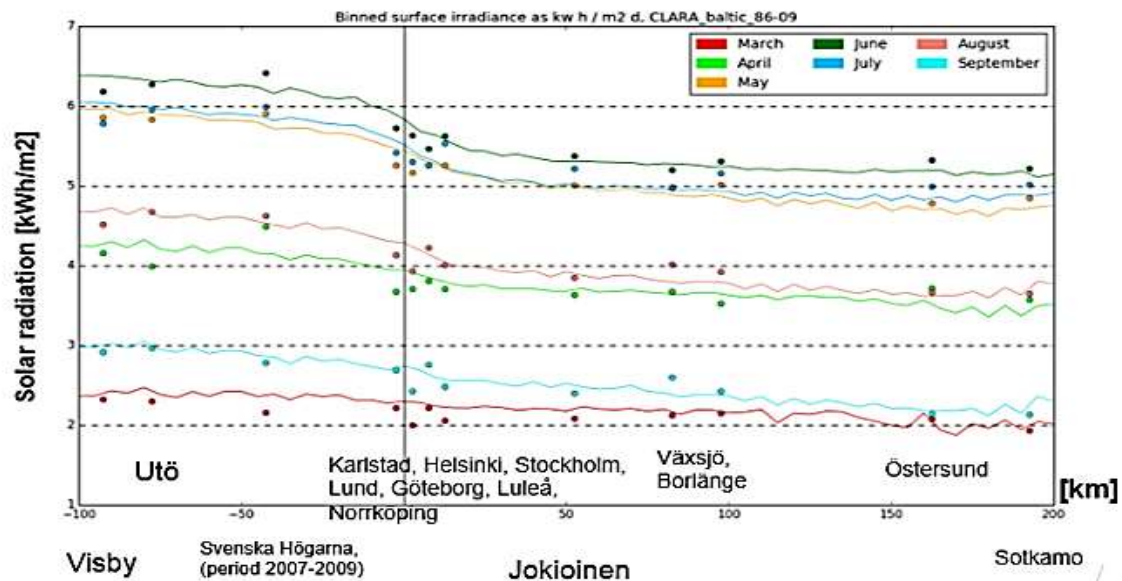
Auringon kokonaissäteilyn määrä vaakasuoralle pinnalle saatiin Ilmatieteenlaitokselta sähköpostilla osoitteesta ilmastopalvelu@fmi.fi. Havaintoasemana käytettiin Oulun Vihreäsaaren sataman sääasemaa. Kyseinen sääasema ei kuulu Ilmatieteen laitoksen ensimmäisen luokan säteilyasemiin, joten säteilytiedot eivät ole ladattavissa havaintojen latauspalvelusta mahdollisten mittausvirheiden vuoksi. Toisen luokan säteilyasemien, esimerkiksi Oulun Vihreäsaaren mittauksissa virhettä voi aiheuttaa horisontti, kuura ja vähäisempi huoltaminen. Kyseisen säteilyaseman säteilytietoja käsittely vaatii erityistä tarkkuuta, koska esimerkiksi kuura antaa liian suuria säteilyarvoja alkukeväästä, ja jos horisontti varjostaa, se aiheuttaa hankaluuksia vertailtaessa atsimuuttikulmia eli paneelikenttien asennusilmansuuntia. (13.) Lisäksi toisen luokan sääasemissa ei mitata säteilyn eri komponentteja, joten säteily jaettiin suoraan ja hajasäteilyyn laskemalla.

Lähin ensimmäisen luokan sääasema sijaitsee Sotkamossa. Sotkamo Kuolanien sääaseman säteilytietojen käyttäminen aineistona ei ollut soveltuvaa, koska säteily poikkeaa suuresti rannikolla ja mantereella. (13.) Kuva 9 on ilmatieteenlaitoksen tutkimus säteilystä merellä, rantaviivalla ja mantereella.



ILMATIETEEN LAITOS
METEOROLOGISKA INSTITUTET
FINNISH METEOROLOGICAL INSTITUTE

CLARA 1986—2009 Baltic monthly



KUVA 9 Ilmatieteenlaitoksen tutkimus säteilystä merellä, rantaviivalla ja mantereella (14)

Säteilyistä laskettiin vuosien 2015, 2016 ja 2017 keskiarvot, jotta vähennettiin vuotuisesta vaihtelusta aiheutuvaa virhettä. Vuodet ovat erilaisia säteilyjen suhteen varsinkin, kun tietoja käsitellään tunnin tarkkuudella. Poikkeamaa vuosien välillä aiheuttaa muun muassa pilvisyys. Aurinkosähköjärjestelmien tehot laskettiin aina puolelta siten, että säteilyyn liittyvät kulmat laskettiin tunnin puolivälistä ja säteilynä käytettiin kolmen mittauksen keskiarvoa. Kun puolelta laskettu teho kerrottiin yhdellä tunnilla, saatiin energia, joka on tuotettu sähkön hinnan ollessa vakio. Ilmatieteenlaitoksen lähettämässä datassa hetkelliset havainnot on ilmoitettu UTC-ajassa, joten säteilyä siirrettiin kesäaikana kolme tuntia ja muuna aikana kaksi tuntia myöhemmäksi.

Oulun Vihreäsaaren sataman sääasemassa mitataan ainoastaan globaalisäteily ja se jaettiin suoraan ja hajasäteilyyn. Säteilyn purkamiseen komponentteihin tarvittiin maapallon ulkopuolinen säteily ja zeniittikulma. Aurinkovakio G_{sc} kuvaa il-

makehän ulkopintaan tulevaa kohtisuoraa säteilyä neliömetrille. Maailman meteorologinen organisaatio hyväksyi aurinkovakioksi $1\,367\text{ W/m}^2$ vuonna 1978. Kyseinen säteily ei kuitenkaan ole täysin vakio, koska auringon ja maan välinen etäisyys vaihtelee $\pm 1,7\%$ vuodessa ja tämä vaikuttaa säteilyyn $\pm 3,4\%$. Vaihtelu otetaan huomioon, kun maapallon ulkopuolinen auringonsäteily lasketaan aurinkovakion ja eksentrisyys korjauskertoimen avulla kaavoilla 10 ja 11. (9.)

$$I_{on} = G_{SC} \times E_0 \quad \text{KAAVA 10}$$

jossa,

I_{on} = eksentrisyys korjauskertoimella korjattu aurinkovakio [W/m^2]

E_0 = eksentrisyys korjauskerroin

G_{SC} = aurinkovakio $1\,367\text{ W/m}^2$

$$E_0 = 1 + 0,033 \times \cos\left(\frac{360 \times D}{365}\right) \quad \text{KAAVA 11}$$

jossa,

D = päivän järjestysluku vuoden alusta laskien

Heinäkuun ensimmäiselle päivälle eksentrisyys korjauskertoimella korjattu säteily laskettiin kaavoilla 10 ja 11.

$$I_{on} = 1\,367 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \times \left(1 + 0,033 \times \cos\left(\frac{360 \times 182}{365}\right)\right) = 1\,321,89 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Globaalisäteily voidaan jakaa komponentteihin Orgillin ja Hollandsin kokemusperäisellä kaavalla 12. Kaavaan 12 tulee sijoittaa kaavoilla 13 ja 14 laskettu K_t eli kirkkausindeksi. (9.)

$$K_d = \frac{I_d}{I} = \begin{cases} 1 - 0,249 \times K_t, \text{ kun } K_t \leq 0,35 \\ 1,557 - 1,84 \times K_t, \text{ kun } 0,35 \leq K_t \leq 0,75 \\ 0,177, \text{ kun } K_t \geq 0,75 \end{cases} \quad \text{KAAVA 12}$$

$$K_t = \frac{I}{I_0} \quad \text{KAAVA 13}$$

$$I_0 = I_{on} \times \cos \theta_z$$

KAAVA 14

jossa,

K_d = hajasäteilyn osuus globaalista säteilystä

I_d = hajasäteily [W/m^2]

I = globaalisäteily [W/m^2]

I_0 = eksentrisyys korjauskertoimella korjattu aurinkovakio [W/m^2]

θ_z = zeniittikulma [$^\circ$]

K_t = kirkkausindeksi

Heinäkuun ensimmäisenä päivänä Oulussa paikallista aikaa 12.30 vaakasuoralle pinnalle säteilevä globaalisäteily jaettiin suoraan ja hajasäteilyyn kaavoilla 12,13 ja 14. Vastaavalla tavalla jaettiin jokaisen vuoden tuntiset säteilyt komponentteihin ja sen jälkeen laskettiin vuosien keskiarvot. (9.)

$$I_0 = 1\,321,89 \frac{W}{m^2} \times \cos 42,8^\circ = 969,9 \frac{W}{m^2}$$

$$K_t = \frac{754 \frac{W}{m^2}}{969,9 \frac{W}{m^2}} = 0,78 > 0,75$$

$$I_d = 754 \frac{W}{m^2} \times 0,177 = 133 \frac{W}{m^2}$$

$$I_b = 754 \frac{W}{m^2} - 134 = 621 \frac{W}{m^2}$$

jossa,

I_b = suora säteily vaakasuoralle pinnalle [W/m^2]

I_d = hajasäteily vaakasuoralle pinnalle [W/m^2]

Kokonaissäteily kallistetun paneelin pinnalle koostuu suorasta-, hajasäteilystä ja asennusalustan heijastamasta säteilystä. Edellä olevalla tavalla lasketut säteilyt ovat vaakasuoralle pinnalle, joten ne pitää laskea kallistetulle pinnalle trigonometrian avulla. Suorasäteily kallistetulle pinnalle lasketaan kaavalla 15. (9.)

$$G_{bT} = G_b \times R_b$$

KAAVA 15

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z}$$

KAAVA 16

jossa,

$G_b = I_b$ = suora auringon säteily vaakasuoralle pinnalle [W/m^2]

θ = tulokulma [$^\circ$]

θ_z = zeniittikulma [$^\circ$]

Laskennassa on huomioitava reunaehto $\theta_z \neq 90^\circ$, koska $\cos 90^\circ = 0$ ja se on nimittäjänä. Laskennassa tämä huomiottiin merkitsemällä R_b yhdeksi, jos zeniittikulma oli 90° . Toisaalta R_b suodatettiin olemaan maksimissaan 10, koska lähellä 90 astetta olevan zeniittikulman kosini on hyvin pieni luku ja silloin R_b on äärettömän suuri. Zeniittikulma on 90 astetta, kun korkeuskulma on nolla eli aurinko ei ole noussut, ja zeniittikulma on lähellä 90 astetta, kun aurinko on hyvin matalla, joten suodatukset eivät aiheuta suurta virhettä laskennassa.

Etelään suunnattuun, 40 asteen kallistuksella rakennettuun paneelikenttään säteilevä suora säteily 1.7.2018 Oulussa paikallista aikaa 12.30 laskettiin kaavoilla 15 ja 16.

$$G_{bT} = 621 \frac{W}{m^2} \times \frac{\cos 12,5^\circ}{\cos 42,8^\circ} = 826 W/m^2$$

Hajasäteily on myös ilmoitettu vaakasuoralle pinnalle ja se voidaan muuttaa kallistetulle pinnalle kaavalla 17 (9).

$$G_{dT} = G_d \times \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right)$$

KAAVA 17

jossa,

G_{dT} = hajasäteily kallistetulle pinnalle [W/m^2]

G_d = hajasäteily vaakasuoralle pinnalle [W/m^2]

β = kallistuskulma [$^\circ$]

Etelään suunnattuun, 40 asteen kallistuksella rakennettuun paneelikenttään säteilevä hajasäteily 1.7.2018 Oulussa paikallista aikaa 12.30 laskettiin kaavalla 17.

$$G_{dT} = 133 \frac{W}{m^2} \times \left(\frac{1 + \cos 40^\circ}{2} \right) = 117 W/m^2$$

Asennusalueen heijastaman säteilyn määrä riippuu aurinkosähköjärjestelmän asennusympäristöstä. Yleinen hyväksytty arvo heijastussuhteelle on 0,2, mutta esimerkiksi tuoreelle lumelle voidaan käyttää jopa arvoa 0,8 (9). Toisaalta jos paneelien ympäristössä on tuoretta lunta, luultavasti myös paneelien päällä on lunta, jos paneelit eivät ole riittävän jyrkässä kulmassa. Lumen vaikutusta on haastavaa huomioida, koska paneelien päällä oleva lumikerros riippuu täysin asennuspaikasta. Samassa rakennuksessa voi olla hyvin erilaisia kattoja vertailtaessa lumen kertymistä.

Suunnitteluvaiheessa tulee ottaa huomioon katon lumisuus ja välttää paneelien asentamista katoille, jotka keräävät talvisin paljon lunta. Lumen kertymiseen vaikuttavat muun muassa sijainti, ilmansuunta, tuuli, vesikaton materiaali, ilmasto ja korkeusasema verrattuna viereisiin kattoihin. Suomessa auringonsäteily on vähäistä talvella, joten hyvin suunnitellun järjestelmän menettämä energia lumisuudesta on vähäistä. Optimointilaskurissa lumisuus on mahdollista huomioida merkitsemällä halutuille kuukausille lumipeiton peittävyys prosentteina. Taulukossa 2 on esitetty heijastussuhteita eri asennuspintoille.

TAULUKKO 2 Asennuspintojen heijastussuhteita (9)

Asennuspinta	Heijastussuhde
Yleinen hyväksytty arvo	0,2
Tuore lumi	0,8
Vanha lumi	0,6
Valkoinen maali	0,8
Kuiva hiekka	0,25

Asennusalustan heijastama säteily kallistetulle pinnalle lasketaan kaavalla 18 (9).

$$G_{gT} = \rho_g \times (G_b + G_d) \times \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \quad \text{KAAVA 18}$$

jossa,

ρ_g = asennusalustan heijastussuhde

G_b = suora säteily vaakasuoralle pinnalle W/m^2

G_d = hajasäteily vaakasuoralle pinnalle W/m^2

Etelään suunnattuun, 40 asteen kallistuksella rakennettuun paneelikenttään alustasta heijastunut säteily 1.7.2018 Oulussa paikallista aikaa 12.30 laskettiin kaavalla 18.

$$G_{gT} = 0,2 \times \left(621 \frac{W}{m^2} + 133 \frac{W}{m^2} \right) \times \left(\frac{1 + \cos 40^\circ}{2} \right) = 133 \frac{W}{m^2}$$

Lopulta kokonaissäteily kallistetulle pinnalle saadaan laskettua kaavalla 19 (9).

$$G_T = G_{bT} + G_{dT} + G_{gT} \quad \text{KAAVA 19}$$

jossa,

G_T = kokonaissäteily kallistetulle pinnalle

G_{bT} = suora säteily kallistetulle pinnalle

G_{dT} = hajasäteily kallistetulle pinnalle

G_{gT} = asennusalustan heijastama säteily kallistetulle pinnalle

Etelään suunnattuun, 40 asteen kallistuksella rakennettuun paneelikenttään säteilevä kokonaissäteily 1.7.2018 Oulussa paikallista aikaa 12.30 laskettiin kaavalla 19.

$$G_T = 621 \frac{W}{m^2} + 133 \frac{W}{m^2} + 133 \frac{W}{m^2} = 887 \frac{W}{m^2}$$

Tässä opinnäytetyössä tehdyissä matriiseissa lumipeiton peittävydet valittiin tammi- ja helmikuulle 100 % ja maaliskuulle 75 %, kun kattokulma oli alle 35 astetta. Kattokulmilla 35 astetta ja sitä jyrkemmällä lumipeitto merkattiin nolllaksi, koska arviotiin, että lumi ei pysy niin jyrkillä kulmilla asennettujen paneelien päällä. Heijastussuhteeksi valittiin tammikuun alusta helmikuun loppuun tuoreen lumen heijastussuhde 0,8 ja maaliskuulle vanhan lumen heijastussuhde 0,6. Muuna aikana heijastussuhteena on käytetty yleistä hyväksyttyä arvoa 0,2. Kyseisten arvojen valinta on hyvin tapauskohtaista riippuen asennuspaikasta, mutta arvot eivät vaikuta merkittävästi lopputuloksiin.

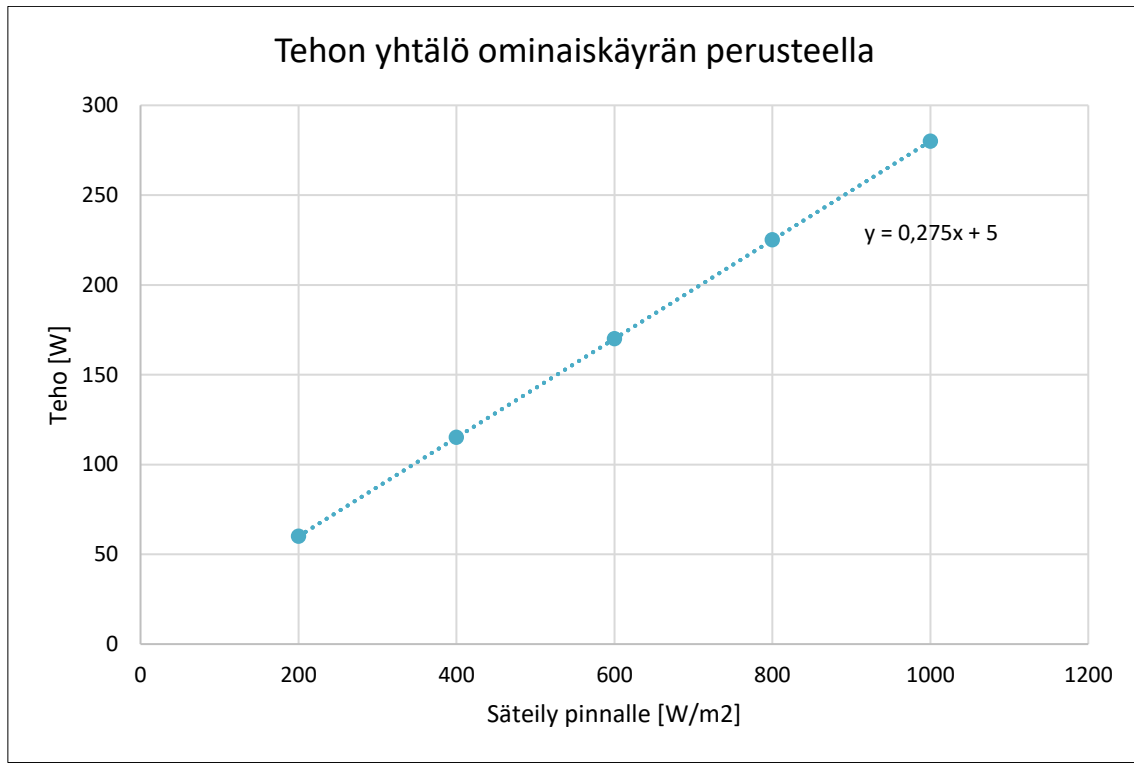
5.2 Säteilystä saatava sähkö

Aurinkosähköjärjestelmä tuottaa säteilystä sähköä tietyllä hyötysuhteella, joka riippuu muun muassa säteilyn määrästä. Tämä voidaan huomioida määrittämällä paneelin tehon yhtälö ja sijoittamalla siihen halutut säteilyt. Taulukon 3 tekniset tiedot on saatu paneelin ominaiskäyrästä.

TAULUKKO 3 Ominaiskäyrän mukaiset tehot ja säteilyt 25 °C:n lämpötilassa

Säteily [W/m^2]	Teho [W]
200	60
400	115
600	170
800	225
1 000	280

Kuvassa 10 on määritetty tehon kaava geneeriselle 280 Wp -monikidepaneelille. Suora on piirretty taulukon 3 arvoilla.



KUVA 10 Paneelin tehon yhtälö ominaiskäyrän arvoilla piirrettynä

Paneelin teho saadaan laskettua 25 °C:n lämpötilassa kaavalla 20.

$$P_{PV} = 0,275 \times G_T + 5 \text{ W}$$

KAAVA 20

P_{PV} = teho [W]

G_T = kokonaissäteily kallistetulle pinnalle [W/m²]

Yhtälö vaatii reunaehdon, jolla teho merkitään nolaksi, kun säteilyä ei ole. Muuten yhtälö antaa viiden watin tehon ilman säteilyä. Lisäksi opinnäytetyössä alle 100 W/m² säteilyllä teho määritettiin nolaksi, koska inverttereillä on haasteita pysyä käynnissä niin matalilla säteilyillä.

Esimerkkilaskelmassa yhden paneelin teho 25 °C:n pinnan lämpötilassa laskettiin kaavalla 20.

$$P_{PV} = 0,275 \times 887 \frac{W}{m^2} + 5 W = 249 W$$

Paneelin kennojen lämpötilat vaikuttavat höytysuhteeseen, ja teho on laskettu 25 °C:n pinnan lämpötilassa. Jos paneelin pinnan lämpötila on alle 25 °C, höytysuhde paranee. Jos pinta on kuumempi kuin 25 °C, höytysuhde laskee. Ilman lämpötilat saatiin säteilytietojen mukana Ilmatieteenlaitokselta. Laskuriin laskettiin kolmen vuoden lämpötilojen keskiarvot, ja näin vähennettiin vuotuisista vaihteluista aiheutuvaa virhettä.

Paneelin pinnan lämpötila saadaan laskettua ilman lämpötilan avulla kaavalla 21, ja kennojen lämpötilojen vaikutus kyseisen paneelin tehoon lasketaan kaavalla 22 (9). Kaavassa 21 on kerroin, ja siihen aiheuttaa hieman virhettä viilentävä tuuli ja vesisade.

$$T_{kenno} = T_{ilma} + k \times G_T$$

KAAVA 21

T_{kenno} = kennojen lämpötila [°C]

T_{ilma} = ilman lämpötila [°C]

k = kerroin = 0,03 [°C/W/m²]

G_T = kokonaissäteily paneelin pintaan [W/m²]

$$T_{vaikutus} = \frac{(0,41 \times (25^\circ\text{C} - T_{kenno}) + 100}{100}$$

KAAVA 22

jossa,

0,41 = asteen vaikutus tehoon verrattuna lämpötilaan 25 °C [%/°C] (TAU-LUKKO 1)

$T_{vaikutus}$ = Lämpötilan vaikutuskerroin

T_{kenno} = kennojen lämpötila [°C]

Geneerisen 280 Wp -paneelin teho, jossa huomioidaan säteilyn ja lämpötilan vaikutus hyötysuhteeseen, saadaan laskettua kaavalla 23 (9).

$$P_{PV} = 0,275 \times G_T + 5 W \times T_{vaikutus} \quad \text{KAAVA 23}$$

jossa,

P_{PV} = teho huomioiden olosuhteet [W]

$T_{vaikutus}$ = lämpötilan vaikutuskerroin

G_T = kokonaissäteily kallistetulle pinnalle [Wh/m²]

Esimerkkilaskelmassa ilman lämpötila oli 18,8 °C ja yhden paneelin teho laskettiin kaavoilla 21, 22 ja 23.

$$T_{kenno} = 18,8^{\circ}\text{C} + 0,03^{\circ}\text{C} / \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \times 887 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} = 45,4^{\circ}\text{C}$$

$$T_{vaikutus} = \frac{0,41 \times (25^{\circ}\text{C} - 45,4^{\circ}\text{C}) + 100}{100} = 0,92$$

$$P_{PV} = 249 W \times 0,92 = 229 W$$

Aurinkosähköjärjestelmässä häviötä aiheuttavat myös invertterit, kaapelit, varjot, likaantuminen ja ikääntyminen. Järjestelmän kokonaishyötysuhde lasketaan kaavalla 24 eikä siinä huomioida paneelin hyötysuhdetta, koska se huomiotiin tehon yhtälössä. (9.)

$$\eta_{järjestelmä} = \eta_{invertteri} \times \eta_{kaapelit} \times \eta_{likaantuminen} \times \eta_{varjot} \times \eta_{ikä} \quad \text{KAAVA 24}$$

jossa,

$\eta_{järjestelmä}$ = järjestelmän kokonaishyötysuhde

$\eta_{invertteri}$ = invertterien hyötysuhde

$\eta_{kaapelit}$ = kaapeleiden häviökerroin

$\eta_{likaantuminen}$ = likaantumisen häviökerroin

η_{varjot} = varjostusten häviökerroin

$\eta_{ikä}$ = ikääntymisen häviökerroin

Taulukossa 4 on hyötysuhteita järjestelmän komponenteille (9).

TAULUKKO 4 Aurinkosähköjärjestelmän komponenttien hyötysuhteita

Komponentti	Hyötysuhde
Invertteri	0,95
Kaapelit	0,97
Likaantuminen	0,95
Ikääntyminen 25 vuoden päästä	0,80

Lopulta tuotettu energia saadaan laskettua kaavalla 25.

$$E_{PV} = n \times P_{PV} \times t \times \eta_{järjestelmä} \quad \text{KAAVA 25}$$

jossa,

E_{PV} = energia [Wh]

n = paneeleiden määrä

t = aika [h]

P_{PV} = yksittäisen paneelin teho [W]

$\eta_{järjestelmä}$ = järjestelmän hyötysuhde

Esimerkkinä laskettiin 1 000 paneelin tuottama energia tunnin aikana kaavalla 25. Paneelikenttä oli etelään suunnattu, 40 asteen kallistukselle rakennettu ja energia laskettiin 1.7.2018 Oulussa paikallista aikaa 12.00–13.00.

$$E_{PV} = 1\,000 \times 229\,W \times 1\,h \times (0,95 \times 0,97 \times 0,95 \times 1 \times 1) = 200\,472\,Wh \\ \approx 200\,kWh$$

5.3 Sähkön arvo

Kaikki opinnäytetyössä ilmoitetut sähkön hinnat ovat arvonlisäverottomia. Sähkön markkinahinnat saatiin Nord Poolin nettisivuilta. Laskennassa käytettiin Elspot vuorokausimarkkinan (day-ahead market) Suomen aluehinnan kolmen vuoden keskiarvoa. Keskiarvo laskettiin vuosien 2015, 2016 ja 2017 tuntihinnoilla ja näin pyrittiin vähentämään vuotuisesta vaihtelusta aiheutuvaa virhettä. Nord Poolin ladattavat tiedot ovat Keski-Euroopan ajassa, eli kesäaika on ajassa UTC+2 ja muu aika UTC+1. Markkinahinnat muutettiin vastaamaan Suomen aikavyöhykettä siirtämällä hintoja yhden tunnin myöhemmäksi. Tuotetun sähkön arvot laskettiin kaavalla 26 vuoden jokaiselle tunnille.

$$Arvo = E \times \grave{a}$$

KAAVA 26

Arvo = tunnissa tuotetun sähkön arvo [€]

E = tunnissa tuotettu sähkö [MWh]

\grave{a} = sähkön markkinahinta [€/MWh]

Esimerkilaskelman tuotetun sähkön arvo laskettiin kaavalla 23.

$$Arvo = 200\,kWh \times \frac{(6,0 + 3,8 + 3,4)\,snt/kWh}{3} = 880\,snt = 8,80\,€$$

Edellä esitetyllä tavalla summat laskettiin vuoden jokaiselle tunnille ja sijoitettiin Excelissä matriisiin. Suurin summa korostettiin ehdollisella muotoilulla, ja matriisista tulokset ovat helposti luettavassa muodossa. Myös tuotetusta sähköstä tehtiin matriisi, jotta optimointia voidaan tehdä ottamatta huomioon markkinahintaa.

35 asteen kulmassa ja jyrkemmille asennuskulmille lumipeite arviotiin nolllaksi. Kattokulman arvioidaan olevan niin jyrkkä, että lumi ei pysy paneelin pinnalla. 30 asteen kulmassa ja loivemmille asennuskulmille lumipeite arviotiin tammi ja helmikuulle 100 % ja maaliskuulle 75 %. Heijastussuhteina käytettiin tammi- ja helmikuulle tuoreen lumen arvoa 0,8 ja maaliskuulle vanhan lumen arvoa 0,6. Muuna aikana heijastussuhteena käytettiin yleistä arvoa 0,2.

Opinnäytetyössä tehdyissä esimerkkimatriiseissa vertailtiin tuotetun sähköän arvoa ja määrää atsimuuttikulmilla -90° - $+90^{\circ}$ ja kallistuskulmilla $+10^{\circ}$ - $+90^{\circ}$. Matriisi tehtiin siis asennusilmansuunnilla idästä länteen. Kallistuskulmia tutkittiin kymmenen asteen kallistuksesta pystyasennukseen saakka. Taulukko tehtiin viiden asteen välein molemmilla kulmilla, ja näin matriisin kooksi tuli 17×37 . Toimeksiantaja voi tehdä laskurilla haluamansa kokoisia matriiseja valitsemillaan lähtötiedoilla. Matriisit 1 MW:n aurinkosähköjärjestelmästä ovat liitteinä 1 ja 2.

6 SÄHKÖMARKKINAT

Sähkömarkkinat voidaan karkeasti jakaa vähittäis- ja tukkumarkkinoihin. Vähittäismarkkinoilla sähkön myyjät käyvät kauppaa pienkuluttajien kanssa, kun taas tukkumarkkinoilla suuret kuluttajat ja vähittäismyyjät hankkivat sähköä sähkön tuottajilta. Pohjoismaisiin sähkömarkkinoihin vaikuttavat usean markkinan yhteisvaikutus, kulutus ja tuotanto, reservit ja säätösähkö, kysyntäjousto, tehoreservit, tasesähkö ja sähkön siirtovarmuus (15).

6.1 Sähkön hinnan muodostuminen markkinoilla

Nord Pool -sähköpörssi on yhteinen tukkumarkkina Pohjoismailla. Pörssissä on usea markkina, ja keskeisin niistä on Elspot-vuorokausimarkkina (day-ahead market). Elspotissa kaupataan sähkö seuraavalle vuorokaudelle. Myyjä ja ostaja jättävät tarjoukset sähköpörssiin kello 13 mennessä, ja tulokset julkaistaan noin tunnin kuluttua. (16.)

Kun vuorokausimarkkinat sulkeutuvat, kaupankäyntiä voidaan jatkaa Elbas-markkinoilla, joka on päivän sisäinen markkina (intra-day market). Elbas-markkina täydentää Elspot-markkinaa, ja joustamaton energia ohjaakin kaupankäyntiä lähemmäs käyttöhetkeä. Esimerkkinä muuttunut tilanne tuuliennusteissa huomioidaan jatkuvilla Elbas-markkinoilla. (16.) Elspot ja Elbas kuuluvat fyysisiin sähkömarkkinoihin.

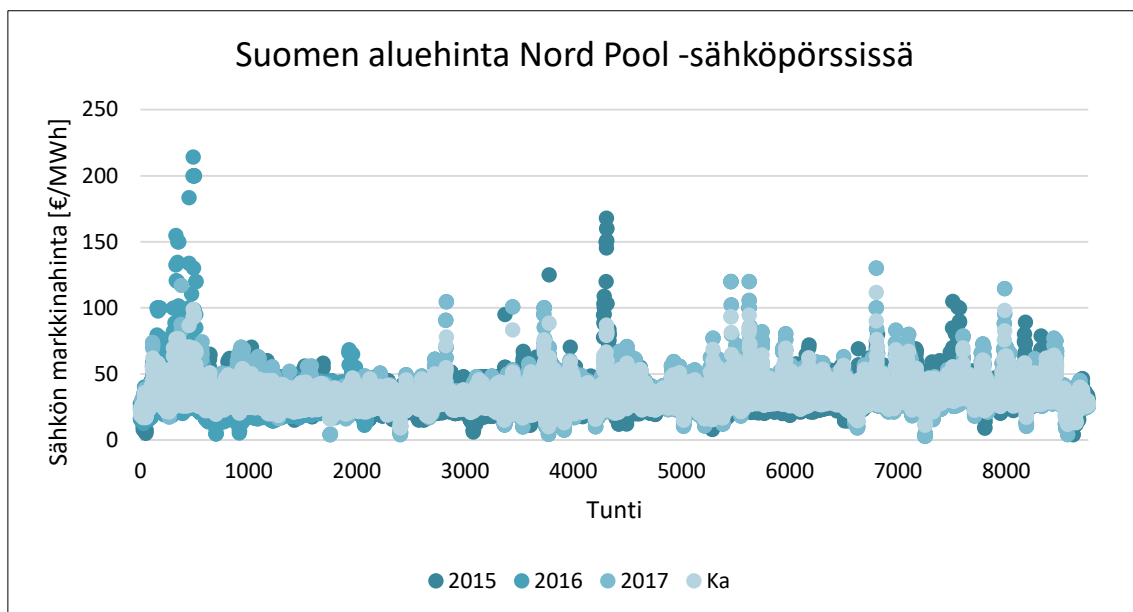
Kantaverkkoyhtiöiden hallinnoimat säätösähkö ja reservimarkkinat seuraavat Elbas-markkinoita ylläpitäen ja tasaten tehoa, jos kysyntä ja tarjonta eivät täsmää (15). Kysynnän ja tuotannon seuraaminen on tärkeää, koska kantaverkon taajuus nousee, jos tuotantoa on enemmän kuin kysyntää, ja laskee, jos kulutusta on liikaa. Suuret häiriöt taajuudessa voivat aiheuttaa laiterikkoja tai sähkökatkoksia.

Sähkön markkinahinta muodostuu siis osittain kysynnän ja tuotannon mukaan, mutta Suomen aluehintaan vaikuttavat suuresti myös rajanaapurit. Suomen omavaraisuusaste on hyvin matala, joten Suomen aluehintaan vaikuttavat muun muassa Norjan ja Ruotsin vesitilanne sekä revisiot Norjassa, Ruotsissa ja Venäjällä. Lisäksi myös kivihiilen hinnan kehityksellä voi olla vähenevä vaikutuksensa Suomen aluehintaan. Sähköjärjestelmän tila -näkylässä voidaan seurata Suomen sähköverkon tilaa ja tilanne päivitetään kolmen minuutin välein: <https://www.fingrid.fi/-/custom/sahkojarjestelman-tila-169/> (17).

Kysyntäjousto tarkoittaa sähkön kulutuksen siirtämistä tunneille, jolloin sähköä olisi tarjolla, ja se on edullista. Joustamattoman tuotannon määrä verkossa lisääntyy tulevaisuudessa, ja se aiheuttaa haasteita nykyiselle markkinamallille. Esimerkkinä ydinvoima ja tuulienergia ovat joustamatonta tuotantoa. Tuulimyllyjen tuottaman energian määrä riippuu tuulisuudesta, ja ydinvoiman säädettävyyden on vähäistä. Sähkömarkkinoiden murroksen, teknologian kehityksen ja poliittisen paineen myötä joustavaa, säätöön kykenevää tuotantokapasiteettia on korvautunut säästä riippuvalla tuotannolla. Kun sään mukaan vaihtelevan sähköntuotannon osuus tuotannosta kasvaa, lisääntyy tarve sähköjärjestelmän joustavuudelle. (18.)

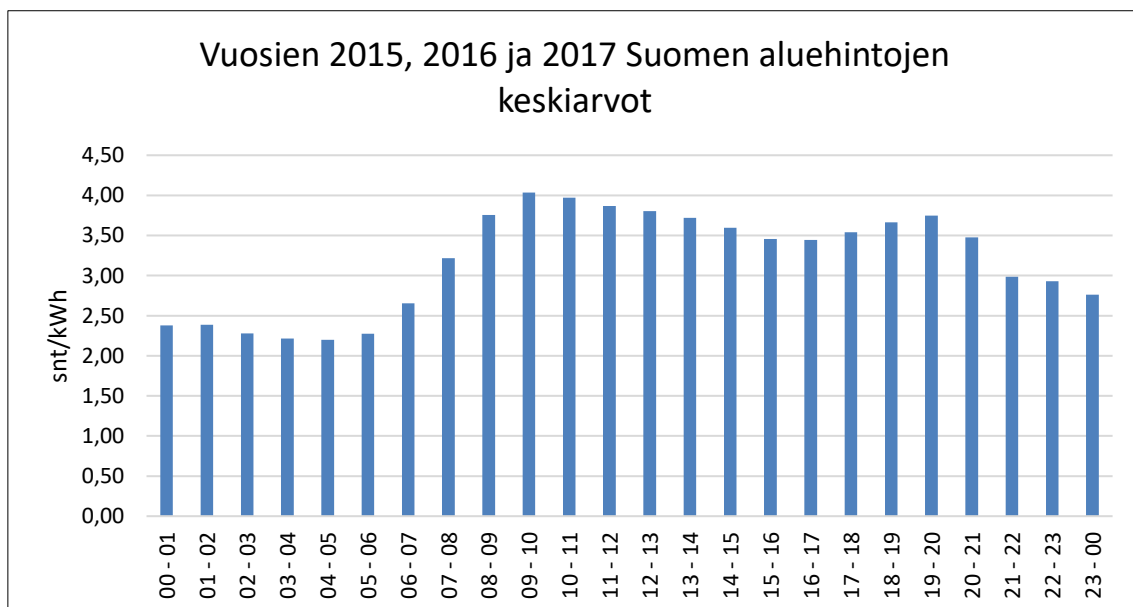
6.2 Eri vuosien sähkön markkinahinnan vertailua

Jotta aurinkosähköjärjestelmän optimointi sähkön markkinahinnan mukaan poikkeaisi tilanteesta, jossa tuotetaan suurin määrä energiaa, tulisi korkea markkinahinta toistua samaan kellonaikaan vuorokausissa. Tällä hetkellä Suomen aluehinta vaihtelee satunnaisesti riippumatta kellonajasta, joten tietty korkea markkinahinta ei toistu. Kuvassa 11 on vuosien 2015, 2016 ja 2017 vuosien Suomen aluehinnan vertailua. Kuvaajasta voi huomata kuinka suurta vaihtelua sähkön markkinahinnassa on vuosien välillä. Keskiarvoa nostaa yleensä yksittäisen vuoden korkea hinta eikä vuosien yhteisvaikutus.



KUVA 11 Suomen aluehinnan vertailua vuosina 2015, 2016 ja 2017 (19)

Sähkön markkinahinnat ovat kuitenkin pääsääntöisesti korkeampia ennen keskipäivää kuin keskipäivän jälkeen. Kuvassa 12 on vuosien 2015, 2016 ja 2017 Suomen aluehintojen keskiarvot vuorokauden tunneille. Kuvasta 12 huomataan, että aurinkosähköjärjestelmät tuottavat energiaa, kun sähkön markkinahinta on korkea.

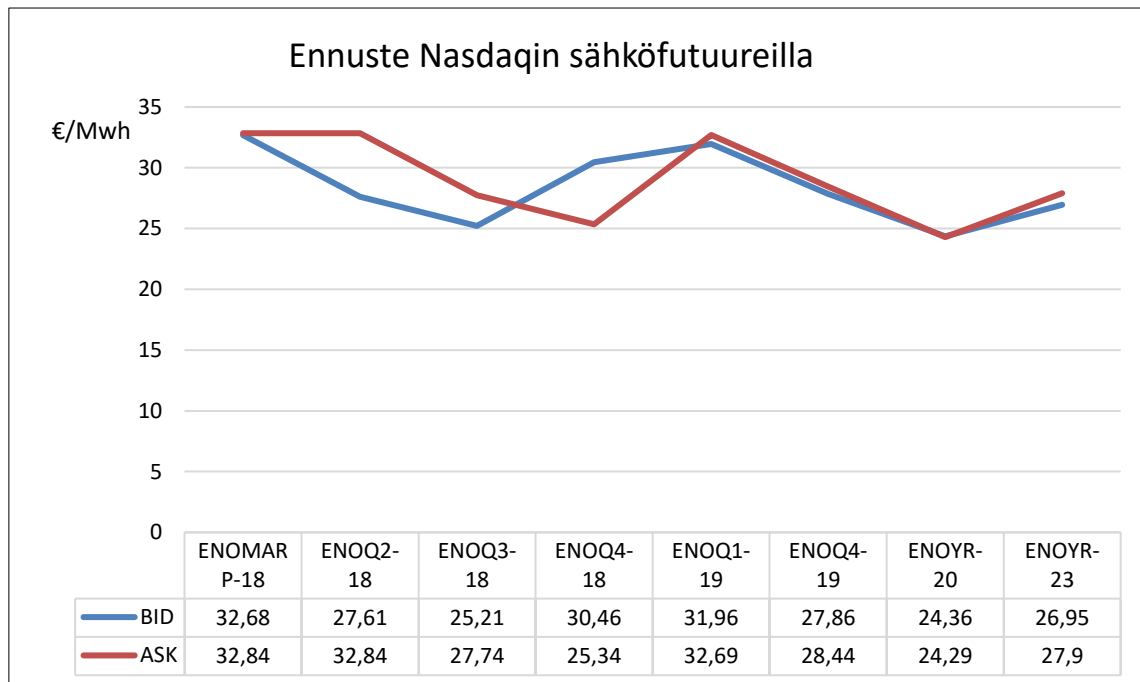


KUVA 12 Kolmen vuoden keskiarvot Suomen aluehinnoista (19)

6.3 Sähkömarkkinoiden tulevaisuus

Energia- ja sähköjärjestelmä elävät muutoksen aikaa. Murrosta ovat nopeuttaneet kestävä kehitys, energiatehokkuus, teknologian kehitys ja poliittinen paine. Sähkön tarjonta on lisääntynyt sään mukaan vaihtelevan tuotannon ansiosta ja taantuma on vähentänyt sähkön kulutusta. Tämä yhtälö on aiheuttanut sähkön hinnan laskun. Vuonna 2017 sähkönkulutus kuitenkin kääntyi kasvuun. Sään mukaan vaihteleva tuotanto ja ydinvoima tarvitset lisää kysyntäjoustoa rinnalleen. (20.)

Systeemihinta tulee laskemaan Nasdaqin sähköfutuureiden mukaan tulevina vuosina. Systeemihinta on pohjoismaisella markkina-alueella sama, ja sen päälle tulee ilmoitusalueen hinta. Futuuri on johdannaismarkkinoiden tuote, eli sopimus kaupasta joka tehdään tulevaisuudessa. BID on korkein hinta, jonka ostaja on valmis maksamaan sähköstä, ja ASK on alin hinta, jonka toimittaja aikoo hyväksyä. Kuvassa 13 on ennustettu sähkön systeemihinnan kehitystä Nasdaqin sähköfutuureilla.



KUVA 13 Ennuste sähkön syteemihinnasta Nasdaqin sähköfutuureilla (21)

7 AURINKOSÄHKÖJÄRJESTELMIEN OPTIMOINTI SÄHKÖ-MARKKINOILLA

Sähkön pientuottajalle ja sähköntoimittajalle soveltuu sama Excel-laskuri aurinkosähköjärjestelmien optimointiin sähkön markkinahinnalla, vaikka näkökulma on hieman erilainen. Sähkön pientuottajan näkökulmasta oletetaan, että sähkö käytetään joka tapauksessa kiinteistön omaan kulutukseen. Jos näin ei ole, aurinkosähköjärjestelmät tulee suunnata kulutusta vastaaviin ilmansuuntiin, jotta tuottaja säästyy kokonaiskustannukselta.

7.1 Pientuottajien hyödyn maksimointi

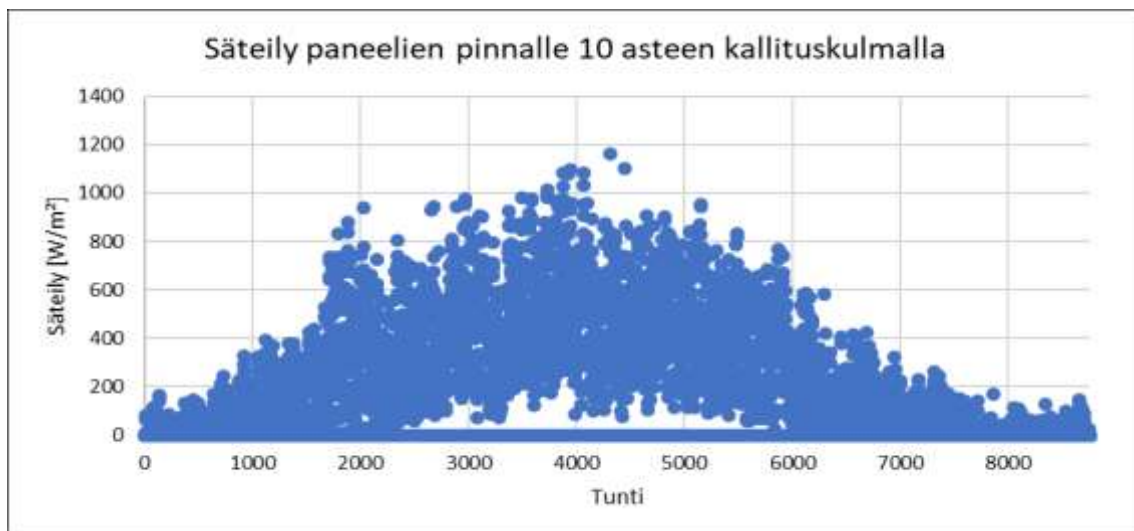
Sähköntoimittaja tekee asiakkaiden kanssa sähkön hinnan suojauksia ja ottaa näin itselleen riskin sähkön markkinahinnan muodostumisesta. Aurinkosähköjärjestelmän optimointi Suomen aluehinnalla vaikuttaa asiakkaan kulutusprofiiliin, ja kun kulutusprofiili on suotuisa sähköntoimittajalle vaikuttaa se asiakkaan hinnan suojaamiseen. Sähkön pientuottajan on siis kannattavinta tuottaa sähköä kalliin markkinahinnan aikaan ja muokata näin omaa kulutusprofiilia edullisemmille tunneille. Suotuisa kulutusprofiili vaikuttaa sähköntoimittajan suojauksiin hintaa alentavasti.

Tässä opinnäytetyössä optimoidaan järjestelmiä pelkästään energian mukaan eikä siis oteta kantaa kokonaiskustannukseen. Kun sähkön pientuottajat tuottavat sähköä omaan kulutukseen, he säästyvät kokonaiskustannukselta. Sähkön kokonaiskustannus muodostuu energiasta, siirtomaksusta ja veroista.

7.2 Aurinkosähköä sähkömarkkinoille parhaalla hyödyllä

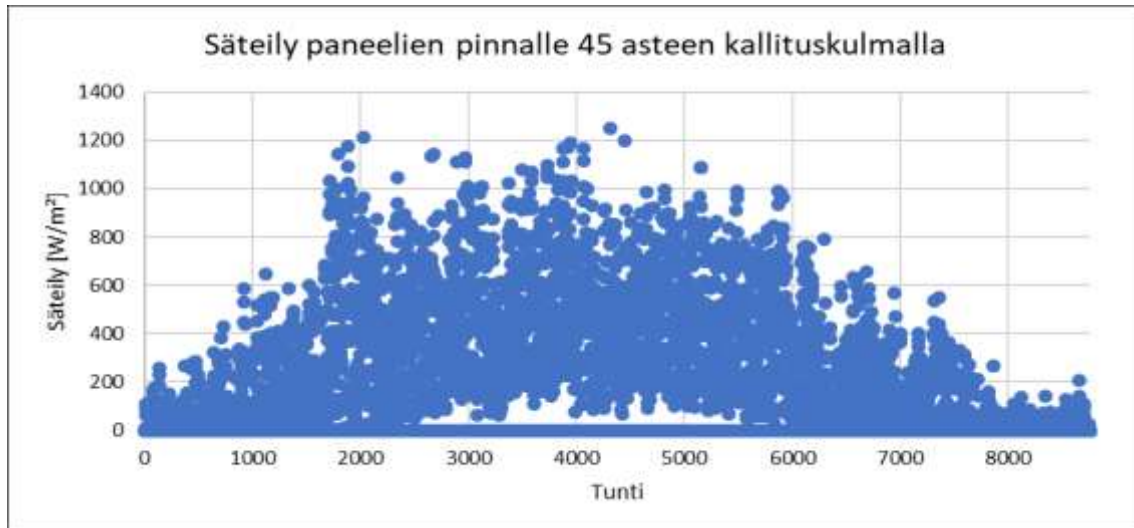
Kun aurinkosähköä tuotetaan sähkömarkkinoille, markkinahinnalla on hyvin suuri merkitys. Aurinkosähköpuistot tulee optimoida markkinahinnan mukaan, jotta järjestelmästä saadaan suurin rahallinen hyöty. Suuria puistoja rakennettaessa asennusilmansuunnan ja kallistuskulman vaikutus korostuu.

Pystyasennuksen on havaittu tuottavan hyvin sähköä, kun aurinko paistaa matalalta eli alkukeväästä ja loppusyksystä, jolloin sähkö on yleensä hieman arvokkaampaa kuin kesäkesällä. Kuvassa 14 on kokonaissäteily etelään suunnatulle paneelikentälle, joka on 10 asteen kallistuskulmassa. Kuvasta 14 voidaan huomata, että säteily on huomattavasti korkeampaa kesällä kuin talvella.



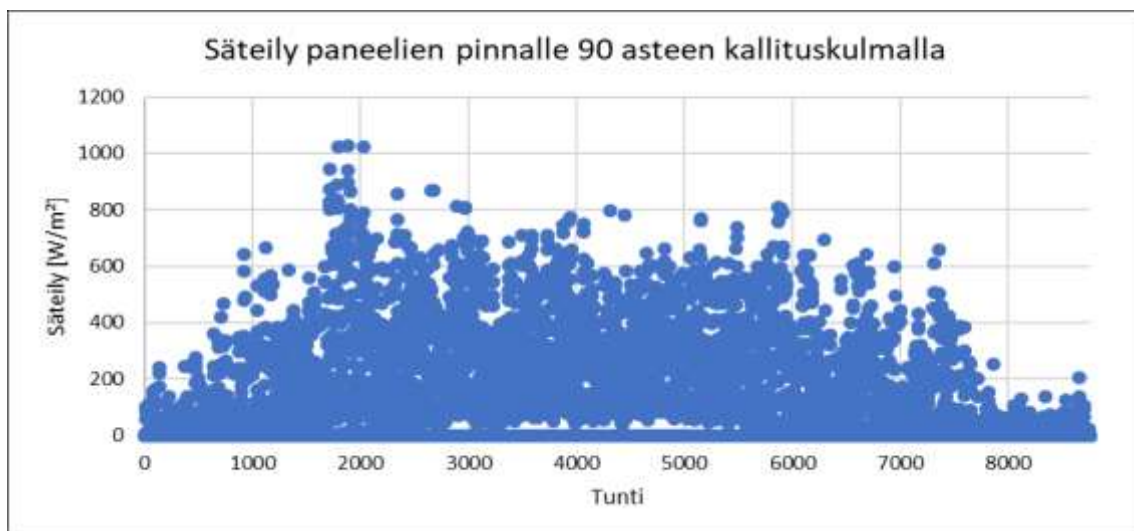
KUVA 14 Säteily paneelien pinnalle 10 asteen kallistuskulmalla

Kuvassa 15 on kokonaissäteily suoraan etelään suunnatulle paneelikentälle, joka on 45 asteen kallistuskulmassa. Kuvassa 15 on jo hieman enemmän säteilyä alku- ja loppuvuodesta kuin kuvassa 14.



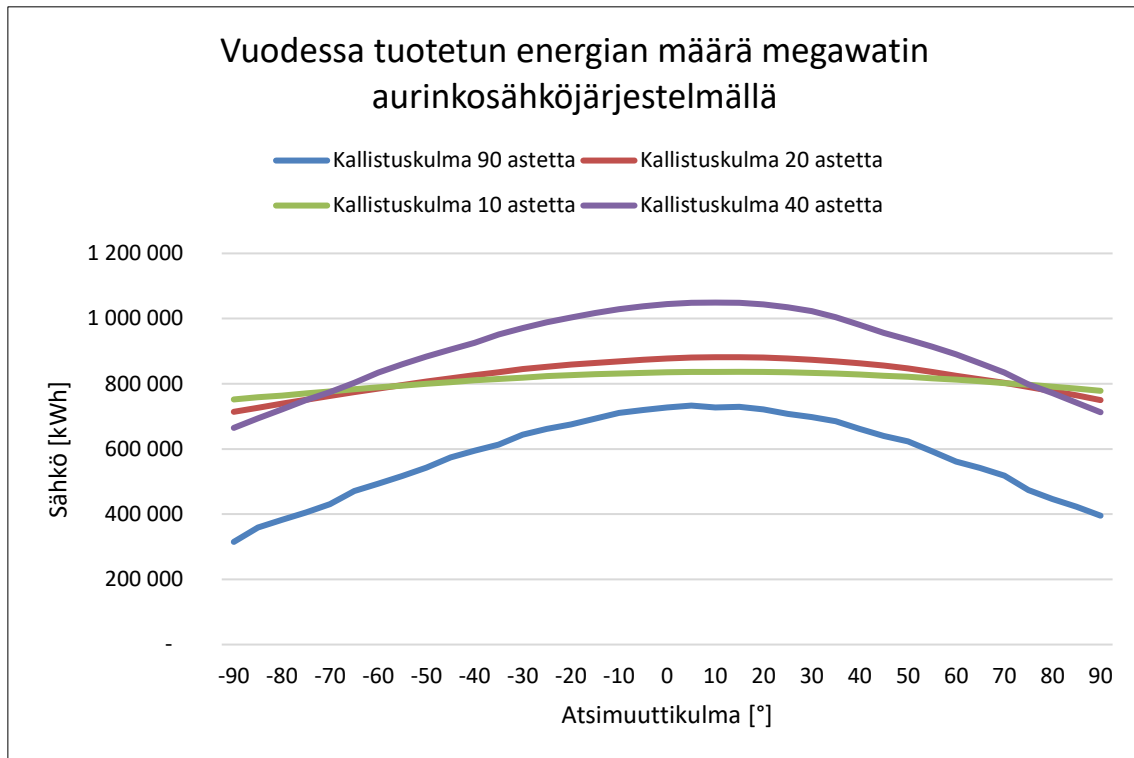
KUVA 15 Säteily paneelien pinnalle 45 asteen kallistuskulmalla

Kuvassa 16 on kokonaissäteily suoraan etelään suunnatulle paneelikentälle, joka on pystyasennossa. Kuvista 14 ja 16 huomataan, että säteilyn määrä pystypinnalle on huomattavasti tasaisempaa vuoden aikana verrattuna 10 asteen kallistuskulmaan.



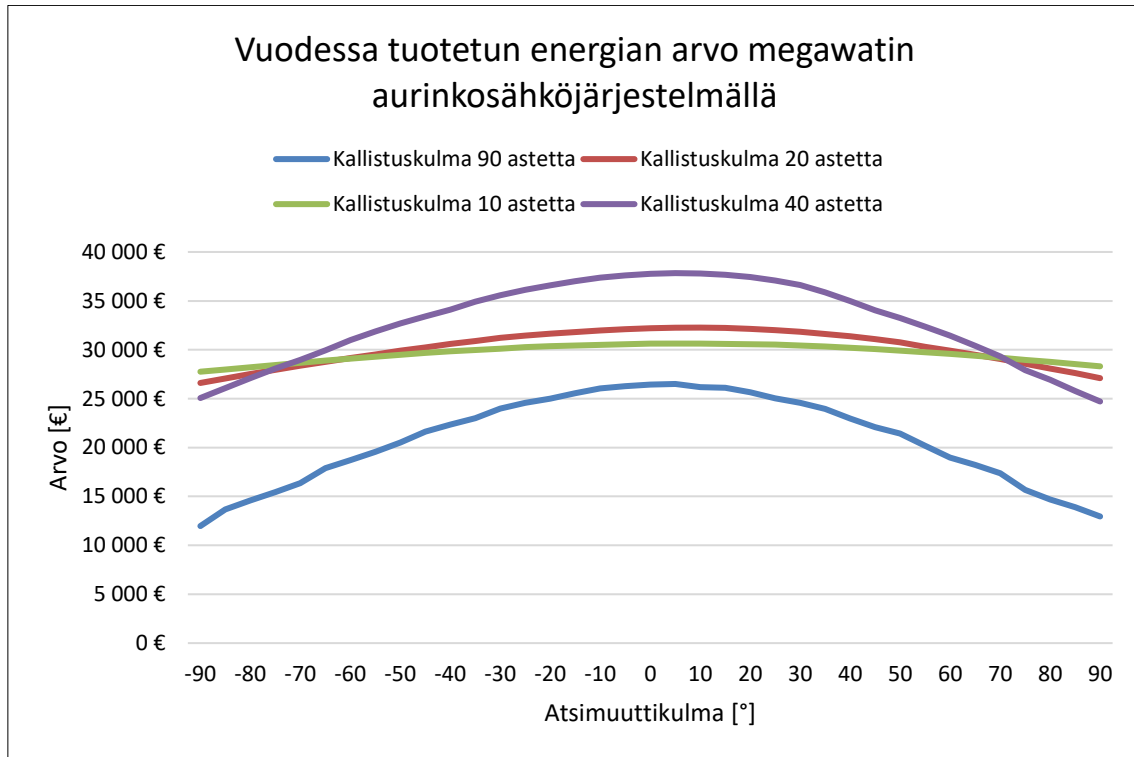
KUVA 16 Säteily paneelien pinnalle 90 asteen kallistuskulmalla

Kuvassa 17 on esitetty megawatin aurinkosähköjärjestelmän vuosituotanto atsimuuttikulman funktiona. Kuvasta huomataan, että loivemmalla kallistuskulmalla atsimuuttikulman vaikutus on pienempi kuin jyrkällä asennuskulmalla. Kuvasta voidaan havaita myös, että itään suunnattu paneelikenttä tuottaa vähemmän sähköä kuin länteen suunnattu kenttä.



KUVA 17 Megawatin järjestelmän vuodessa tuottama sähkö

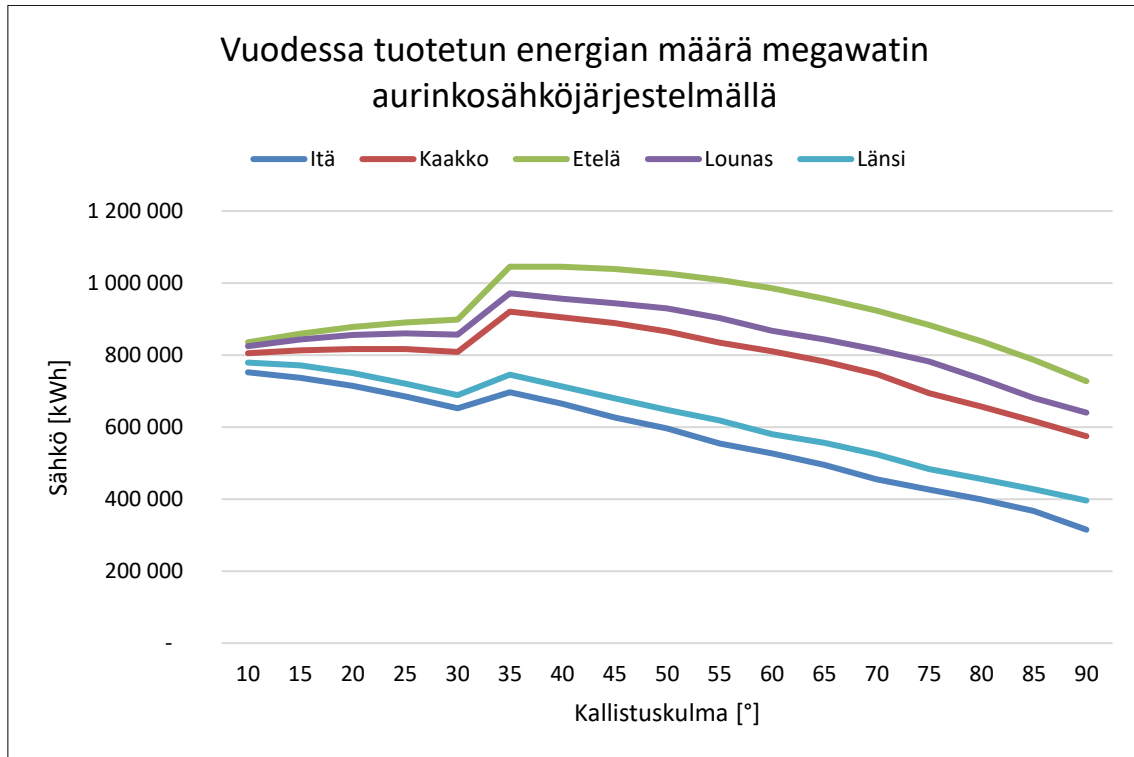
Kuvassa 18 on vastaava vertailu tuotetun sähkön arvon perusteella. Kuvasta 18 voidaan huomata, että itään suunnatuista paneelikentistä saadut rahalliset hyödyt ovat hyvin lähellä länteen suunnattujen paneelikenttien arvoja.



KUVA 18 Megawatin järjestelmän vuodessa tuottaman sähkön arvo

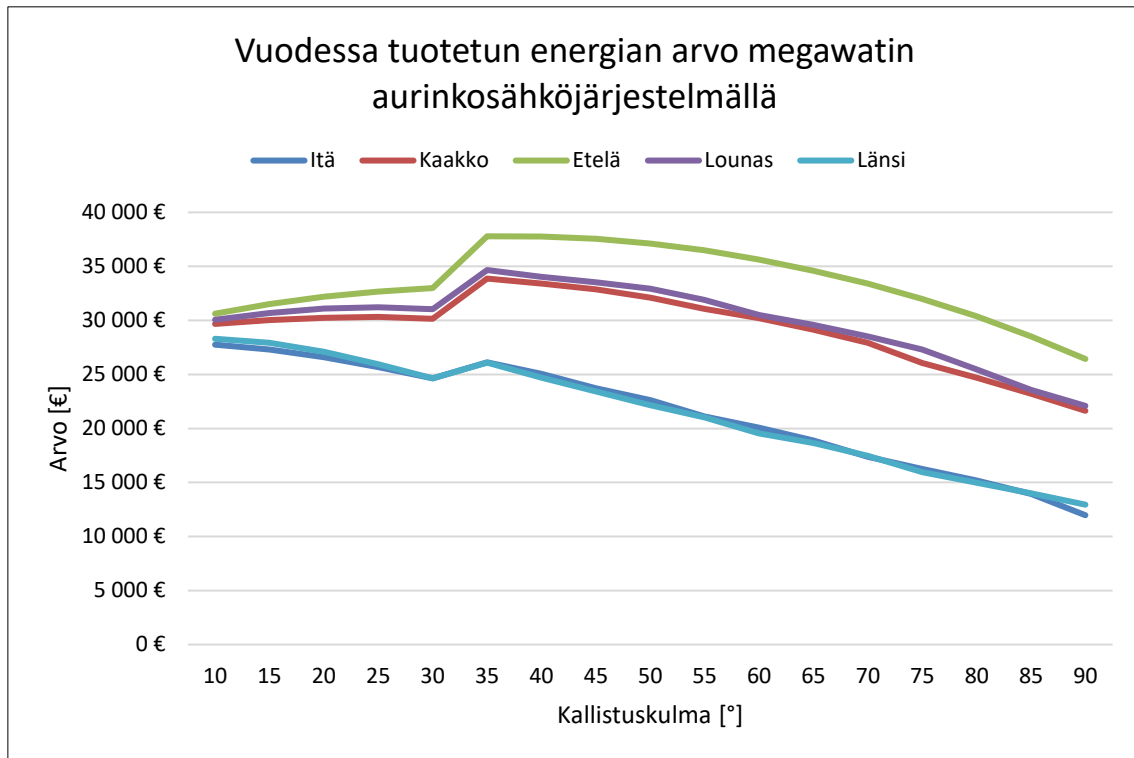
Kuvissa 17 ja 18 kallistuskulmien 10, 20 ja 40 viivat leikkaavat toisensa. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että kun atsimuuttikulma on pienempi kuin -70 astetta tai suurempi kuin 70 astetta, suurin hyöty saadaan 10 asteen kallistuksilla asennetuista aurinkosähköjärjestelmistä. Kuvia 14 ja 15 vertailtaessa voi huomata, kuinka aamupäivän kalliimmat sähkön markkinahinnat siirtävät optimaalisia atsimuuttikulmia kuvaajissa hieman vasemmalle.

Kuvasta 19 nähdään, että asennusilmansuuntana lounas tuottaa enemmän sähköä kuin kaakko, ja länsi tuottaa enemmän kuin itä. Tuotannon nousu 30 ja 35 asteen välillä johtuu valituista lumipeitteistä tammi-, helmi- ja maaliskuulle.



KUVA 19 Megawatin järjestelmän vuodessa tuottama sähkö

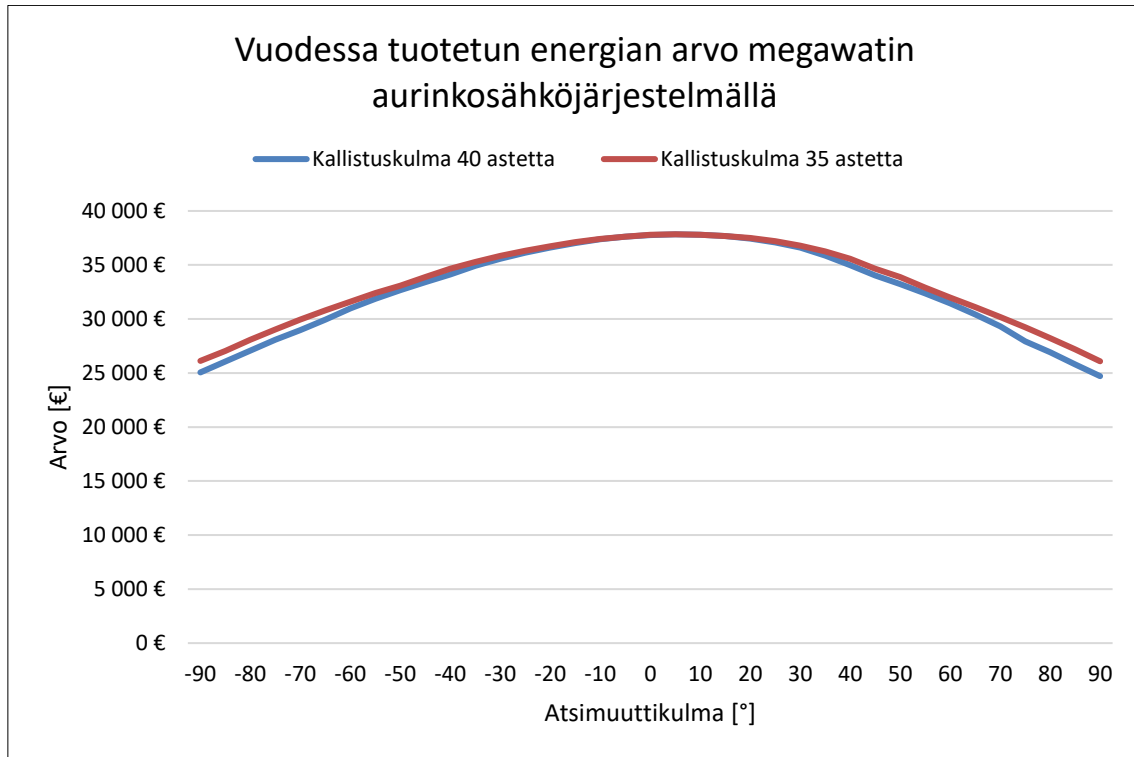
Kuvasta 20 voidaan huomata, että aamupäivän kalliimmat sähkön markkinahinnat tasoittavat hyödyt kaakon ja lounaan välillä samaksi. Rahallinen hyöty itään ja länteen asennettujen järjestelmien välillä on tietyillä kallistuskulmilla täsmälleen sama. Rahallisen hyödyn nousu 30 ja 35 asteen välillä johtuu valituista lumipeitteistä tammi-, helmi- ja maaliskuulle.



KUVA 20 Megawatin järjestelmän vuodessa tuottaman sähkön arvo

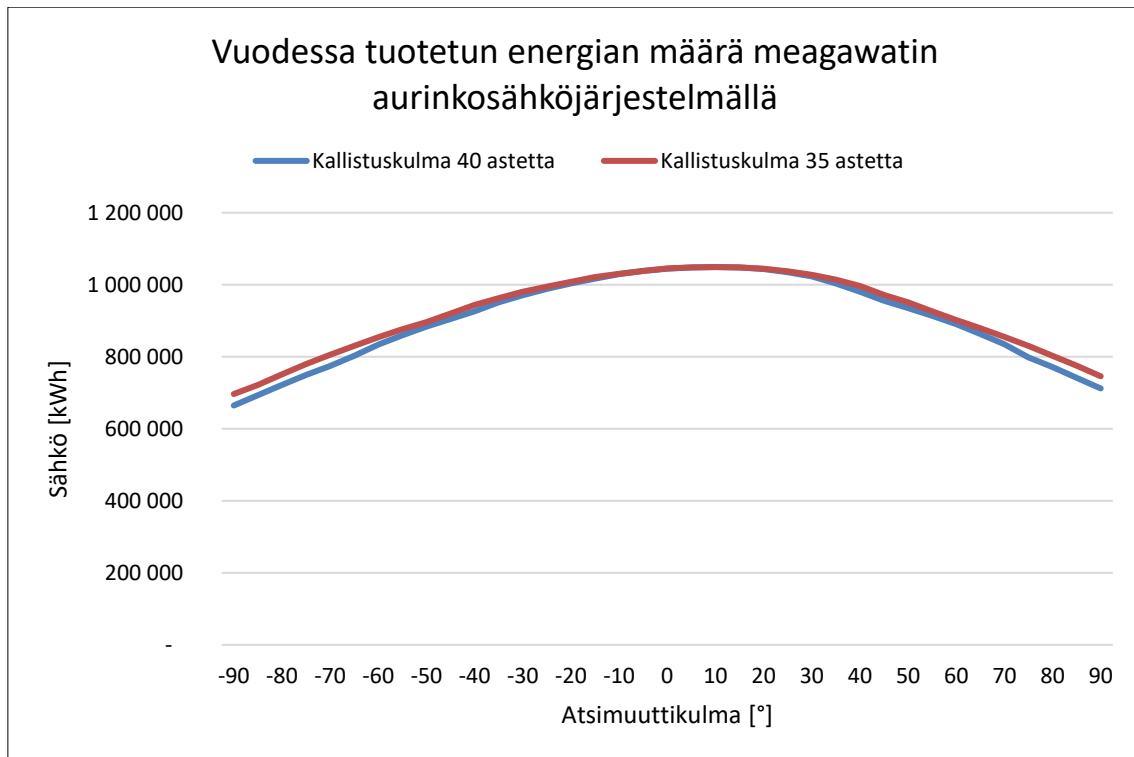
Tässä opinnäytetyössä optimiasennuskulmat tuotetun sähkön perusteella olivat kallistuskulma 40 astetta ja atsimuuttikulma 10 astetta. Vastaavat optimikulmat sähkön markkinahinta huomioon otettuna olivat kallistuskulma 35 astetta ja atsimuuttikulma 5 astetta.

Kuvasta 21 voidaan huomata, että rahalliset hyödyt kallistuskulmilla 35 ja 40 ovat hyvin lähellä toisiaan, kun atsimuuttikulman poikkeama etelästä on alle 30 astetta.



KUVA 21 Megawatin järjestelmän vuodessa tuottaman sähkön arvo

Kuvassa 22 on vertailtu megawatin aurinkosähköjärjestelmiä vuodessa tuotetun sähkön perusteella kallistuskulmilla 40 ja 35.



KUVA 22 Megawatin järjestelmän vuodessa tuottama sähkö

Taulukossa 5 ovat prosenttiosuudet tuotetun sähkön perusteella eri asennuskulmilla. Taulukossa ovat mukana lumipeitteet alle 35 asteen kallistuksella toteutetuilla kentillä.

TAULUKKO 5 Asennuskulmien vertailua tuotetun sähkön perusteella

Ilmansuunta	$\beta = 10^\circ$	$\beta = 20^\circ$	$\beta = 40^\circ$	$\beta = 90^\circ$
Itä	72 %	68 %	63 %	30 %
Kaakko	77 %	78 %	87 %	55%
Etelä	80 %	84 %	100 %	70 %
Lounas	79 %	82 %	91 %	61 %
Länsi	75%	72 %	68 %	38 %

Taulukossa 6 ovat prosenttiosuudet tuotetun sähkön arvon perusteella eri asennuskulmilla. Taulukosta voi huomata, että itään ja kaakkoon suunnatut järjestelmät saavuttavat hieman optimiasennusta. Toisaalta lounaaseen ja länteen suunnatut kentät hieman menettävät hyötyään verrattuna optimiasennukseen, kun vertailua tehdään tuotetun sähkön arvon perusteella. Taulukossa ovat mukana lumipeitteet alle 35 asteen kallistuksella toteutetuilla kentillä.

TAULUKKO 6 Asennuskulmien vertailua tuotetun sähkön arvon perusteella

Ilmansuunta	$\beta = 10^\circ$	$\beta = 20^\circ$	$\beta = 40^\circ$	$\beta = 90^\circ$
Itä	73 %	70 %	66 %	32 %
Kaakko	79 %	80 %	88 %	57 %
Etelä	81 %	85 %	100 %	70 %
Lounas	80 %	82 %	90 %	58 %
Länsi	75 %	72 %	65 %	34 %

8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Vaikka sähkön Suomen aluehinta on hyvin epävakaa, optimointi sähkön markkinahinta huomioituna poikkeaa optimoinnista tuotetun energian perusteella. Teollisuuden Voima Oyj:n rakenteilla oleva Olkiluoto 3 tulee luultavasti vakauttamaan Suomen aluehintaa, ja vähentämään sen riippuvuutta Ruotsista, Norjasta ja Venäjästä. Johtopäätöksissä on mainittu opinnäytetyötä tehtäessä havaittuja asioita sekä tuotetun energian että sähkön arvon perusteella.

Kun asennuskulmaa jyrkennetään, soveltuva atsimuuttikulma-alue kapenee. Loivilla kattoasennuksilla kenttiä voidaan suunnata itään ja länteen, mutta pystyasennuksia ei ole kannattavaa suunnata esimerkiksi kaakkoon. Kun atsimuuttikulma on pienempi kuin -70 astetta, tai suurempi kuin 70 astetta, suurin hyöty saadaan 10 asteen kallistuksilla asennetuista aurinkosähköjärjestelmistä.

Kun energiaa tuotetaan sähkömarkkinoille, itään suunnatuista paneelikentistä saadut rahalliset hyödyt ovat hyvin lähellä länteen suunnattujen paneelikenttien arvoja. Myös kaakkoon suunnatuista paneelikentistä saadut rahalliset hyödyt ovat hyvin lähellä lounaaseen suunnattujen paneelikenttien arvoja. Pientuottajien rahallinen hyöty on kuitenkin suurempi länteen suunnatuista aurinkosähköjärjestelmistä kuin itään suunnatuista paneelikentistä, koska he säästävät myös siirrolta ja veroilta. Myös lounaaseen suunnatuista aurinkosähköjärjestelmistä pientuottajat hyötyvät enemmän kuin kaakkoon suunnatuista. Hyöty poikkeaa verojen ja siirron verran energiasta, minkä lounaaseen suunnattu järjestelmä tuottaa enemmän kuin kaakkoon suunnattu.

Jos pinta-ala on rajallinen, loivalla kallistuskulmalla riviväliä saadaan lyhennettyä. Jyrkentämällä kallistuskulmaa riviväliä tulee kasvattaa, jotta paneelit eivät varjosta takana olevaa riviä. Toisaalta jos paneeleita täytyy suunnata itään tai länteen, tulee se tehdä loivalla asennuskulmalla. Tilanne jolloin täytyy suunnata kenttiä itään tai länteen voi johtua varjoista tai kattokulmista.

Tämän opinnäytetyön perusteella hyöty julkisivuasennuksen ja kattoasennuksen välillä ei pienene, kun järjestelmiä optimoidaan sähkönmarkkinahinnan perusteella. Vertailtaessa etelään suunnattuja järjestelmiä 10 asteen ja 90 asteen kallistuksella prosentteina menetetään melkein sama määrä rahaa kuin energiaa menetetään. Kesälle sijoittajat voimalaitosten revisiot nostavat sähkön markkinahintaa kesäaikaan, joten kattoasennukset tuottavat myös arvokasta sähköä. Lisäksi tutkitussa datassa alkuvuosien Suomen toteutuneet aluehinnat olivat matalia verrattuna esimerkiksi alkuvuoden 2018 sähkön markkinahintoihin. Excel-laskurilla tarkastelu voidaan tehdä uudestaan loppuvuodesta 2018.

9 YHTEENVETO

Työn tarkoituksena oli selvittää sähkön markkinahinnan vaikutusta aurinkosähköjärjestelmien optimoinnissa. Maa kiertää auringon ympäri noin 365 päivässä ja akselinsa ympäri vuorokaudessa. Edellä mainituista johtuen aurinkopaneeleiden kallistuskulma ja asennusilmasuunta vaikuttavat ajankohtaan, jolloin aurinkosähköjärjestelmä tuottaa sähköä. Jyrkässä kulmassa olevat paneelit tuottavat hyvin sähköä, kun aurinko paistaa matalalta eli alkukeväästä ja loppusyksystä, kun taas loivassa kulmassa oleva kattoasennus tuottaa paremmin sähköä, kun aurinko paistaa korkealta. Toisaalta keväällä ja syksyllä sähkön markkinahinta on yleensä hieman korkeampi kuin keskikesällä. Julkisivuasennusten tuottaman sähkön korkea markkinahinta ei tullut esille tässä opinnäytetyössä, vaan prosentteina menetetty sähkö ja arvo olivat hyvin lähellä toisiaan. Sähkön hintaa kesällä nostavat voimalaitosrevisiot, ja tästä syystä myös kattoasennukset tuottavat Suomen aluehinnaltaan arvokasta sähköä.

Vuorokausitasolla vertailtaessa asennusilmansuuntana lounas tuottaa enemmän sähköä kuin kaakko, mutta aamupäivien kalliimmat sähkönmarkkinahinnat nostavat kaakkoasennusten rahalliset hyödyt vastaamaan lounaaseen suunnattuja asennuksia. Toisaalta myös länteen suunnatut järjestelmät tuottavat enemmän sähköä kuin itään suunnatut, mutta aamun korkeammat markkinahinnat tasoittavat rahalliset hyödyt hyvin lähelle toisiaan.

Suomen aluehinta on hyvin epävakaa. Tiettyä huomattavan kallista tuntia vuorokausista ei löydetty kolmen vuoden markkinahintojen perusteella. Jos Suomen aluehinta vakaantuu esimerkiksi ydinvoimalaitosten vaikutuksesta, tulee tarkastelu aurinkosähköjärjestelmien optimoinnista sähkön markkinahinnan mukaan tehdä uudestaan. Jos vuorokausissa on tietty kallis Suomen aluehinta toistuvasti, voi optimointi sähkön markkinahinnan perusteella poiketa merkittävästi verrattuna optimointiin tuotetun energian perusteella.

LÄHTEET

1. Mitä EU tekee? Energiaunioni ja ilmastotoimet. Saatavissa: <http://publications.europa.eu/webpub/com/factsheets/energy/fi/>. Hakupäivä 13.3.2018.
2. Renewable energy statistics. Eurostat. Saatavissa: http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Renewable_energy_statistics. Hakupäivä 13.3.2018.
3. Sähköverkkoon kytketty aurinkosähkökapasiteetti yli kolminkertaistui vuodessa. Energiavirasto. Saatavissa: <http://www.energiavirasto.fi/-/sahkoverkkoon-kytketty-aurinkosahkokapasiteetti-yli-kolminkertaistui-vuodessa>. Hakupäivä 13.3.2018.
4. Toppilan voimalaitos. Oulun Energia. Saatavissa: <https://www.ouluenergia.fi/energia-ja-ymparisto/energiantuotanto/voimalaitokset/toppilan-voimalaitos>. Hakupäivä 7.3.2018.
5. Tahkokorpi, Markku 2016. Aurinkoenergia Suomessa. Helsinki: Into kustannus.
6. Introduction to Solar Radiation. Newport. Saatavissa: <https://www.newport.com/t/introduction-to-solar-radiation>. Hakupäivä 21.3.2018.
7. Ahoranta, Jukka 2017. Sähkötekniikka. Helsinki: Sanoma Pro Oy.
8. Aurinkosähköteknologiat. Motiva. Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkojarjestelmat/aurinkosahko-teknologiat. Hakupäivä 31.3.2018.
9. Kavadias, Kosmas 2017. 5G00BI39 Solar Power 3 op. Opintojakson luennot keväällä 2017. Oulu: Oulun ammattikorkeakoulu, energia- ja automaatio-osasto.

10. Retkikartta. Metsähallitus. Saatavissa: <https://www.retkikartta.fi/>. Hakupäivä 31.1.2018.
11. World Time Zones Wall Map. Maps.com. Saatavissa: <https://www.maps.com/world-time-zones-wall-map.html>. Hakupäivä 8.3.2018.
12. The terminology and concepts used to determine the magnitude and direction of incident solar radiation. Cibsejourna. Saatavissa: <https://www.cibsejournal.com/cpd/modules/2013-07/>. Hakupäivä 8.3.2018.
13. Lindfors, Anders 2018. Tutkijaprofessori, Ilmatieteenlaitos. Puhelinhaastattelu. 5.3.2018.
14. Lindfors, Anders 2018. Re: rannikkoseutujen aurinkoisuus. Sähköpostiviesti. Vastaanottaja: Aleksi Alamattila. 5.3.2018.
15. Sähkömarkkinat. Fingrid. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/>. Hakupäivä 14.3.2018.
16. Miten sähkömarkkinat toimivat? Smart Energy Transition. Saatavissa: <http://smartenergytransition.fi/fi/miten-sahkomarkkinat-toimivat/>. Hakupäivä 8.3.2018.
17. Sähköjärjestelmäntila. Finngrid. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/-/custom/sahkojarjestelman-tila-169/->. Hakupäivä: 14.3.2018.
18. Kysyntäjousto. Finngrid. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/kysyntajousto/>. Hakupäivä: 14.3.2018.
19. Historical Market Data. Nord Pool. Saatavissa: <https://www.nordpoolgroup.com/historical-market-data/>. Hakupäivä: 14.3.2018.

20. Sähkömarkkinoiden tulevaisuus. Finngrid. Saatavissa: <http://www.sahko-markkinoidentulevaisuus.fi/>. Hakupäivä: 14.3.2018.
21. Sähköfutuurit. Nasdaq pörssikauppa. Saatavissa: <http://www.nasdaqomx.com/commodities/market-prices>. Hakupäivä 8.3.2018.

MEGAWATIN AURINKOSÄHKÖJÄRJESTELMÄN VUODESSA TUOTTAMA SÄHKÖ ERI ASENNUSKULMILLA

LIITE 1

Vuodessa tuotettu sähkö [kWh]		Kallistuskulma [°]																
		10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
A t s i m u u t i u l m a	-90	751 945	736 549	713 992	684 864	652 007	696 612	664 717	626 084	596 462	554 704	526 740	494 936	454 968	426 044	399 011	366 770	314 944
	-85	758 290	745 153	726 132	700 491	670 305	722 063	693 761	654 596	627 485	595 633	557 984	528 802	492 383	449 171	422 445	392 415	359 489
	-80	764 140	754 272	738 915	716 579	688 413	751 467	721 934	690 584	656 638	627 964	592 555	560 563	532 408	488 084	444 158	414 343	382 976
	-75	770 301	762 851	750 767	732 310	706 294	779 347	749 612	723 293	685 902	659 158	627 244	585 044	557 833	529 004	496 017	439 054	404 987
	-70	776 544	771 132	762 745	747 215	724 240	805 546	774 644	751 922	722 452	690 500	660 876	623 949	581 779	552 177	520 756	485 579	430 281
	-65	782 930	779 303	774 115	761 832	740 576	830 495	802 834	779 014	753 235	718 237	691 839	664 665	624 444	575 494	543 744	509 094	471 220
	-60	788 785	788 599	785 395	776 160	758 473	854 159	833 985	805 035	781 558	752 869	714 601	688 767	658 737	625 151	569 415	531 807	493 334
	-55	794 181	797 279	795 621	790 288	776 581	876 587	859 854	835 180	811 084	784 600	750 501	710 593	681 542	648 947	612 727	559 799	516 792
	-50	800 062	805 396	806 545	803 352	794 004	896 522	883 841	864 429	834 627	812 727	787 386	747 848	703 789	671 604	635 604	595 991	543 138
	-45	805 287	813 390	816 449	816 177	808 960	920 395	904 717	888 744	865 341	834 410	810 622	781 485	747 481	693 834	656 905	616 724	574 394
	-40	810 385	820 773	826 614	828 345	824 382	943 999	926 039	910 908	891 759	864 903	831 551	803 555	771 028	734 828	684 501	637 773	594 504
	-35	814 643	827 467	835 627	839 137	837 720	962 840	950 812	932 555	915 519	892 611	860 992	822 404	791 315	756 713	716 018	667 159	613 469
	-30	818 892	834 257	844 840	850 150	850 216	980 234	971 218	955 131	934 893	914 838	888 979	857 283	812 991	774 875	734 296	691 875	643 826
	-25	823 243	839 915	852 150	859 342	861 842	994 910	988 711	976 592	956 758	932 749	908 788	879 138	844 164	799 416	752 289	709 239	661 184
	-20	826 363	844 924	858 572	868 265	872 077	1 008 197	1 003 531	992 828	976 045	954 030	923 758	895 263	862 343	823 762	778 694	725 034	675 280
	-15	829 203	849 910	864 205	874 990	880 268	1 021 137	1 017 371	1 007 524	992 416	971 853	945 571	910 937	876 899	839 458	795 298	749 213	693 435
	-10	831 523	853 623	869 166	880 963	887 511	1 030 514	1 029 040	1 021 241	1 008 057	988 044	961 953	931 283	894 129	850 797	808 536	762 302	711 102
	-5	833 630	856 571	873 951	886 530	893 233	1 038 697	1 038 165	1 031 131	1 018 403	1 000 014	976 672	946 954	911 524	870 079	822 309	771 659	719 742
	0	835 283	859 416	877 875	890 452	898 655	1 045 238	1 044 743	1 038 359	1 025 949	1 008 575	985 083	956 363	922 991	883 309	838 174	786 063	727 220
	5	836 242	861 474	880 399	893 338	900 755	1 048 559	1 048 443	1 042 398	1 030 406	1 013 124	989 909	961 597	927 590	888 792	843 836	792 199	733 135
	10	836 435	862 426	881 255	894 087	901 905	1 049 163	1 049 193	1 043 836	1 032 297	1 014 702	991 041	962 712	927 642	887 248	840 236	782 373	727 009
	15	836 713	862 230	881 501	893 998	902 113	1 047 899	1 048 172	1 042 312	1 030 137	1 011 656	987 180	957 491	920 635	867 728	822 452	777 428	728 959
	20	836 288	860 998	880 360	892 647	900 277	1 044 431	1 043 433	1 036 433	1 022 683	1 003 105	976 877	933 192	894 403	859 638	820 209	775 504	721 055
	25	835 305	859 296	877 730	889 651	897 236	1 037 799	1 034 992	1 026 530	1 011 160	979 159	944 252	919 572	889 069	854 584	814 610	759 220	707 399
	30	833 334	856 373	874 058	885 110	890 222	1 027 929	1 023 454	1 008 861	984 005	957 012	936 254	911 109	880 316	838 457	788 232	743 016	698 047
	35	831 048	853 120	868 875	878 850	881 853	1 014 315	1 004 097	984 251	961 692	945 893	924 321	897 191	851 089	811 520	774 237	732 853	685 206
	40	828 108	848 317	862 986	870 562	870 717	996 185	980 307	960 250	948 010	930 426	900 360	858 565	830 751	798 153	761 064	711 922	661 098
45	824 683	843 462	856 092	860 008	856 485	971 394	955 900	943 940	929 325	903 130	867 312	843 080	814 438	781 770	732 816	680 817	639 930	
50	821 147	837 811	847 453	848 058	840 292	951 184	935 689	923 329	902 456	870 084	849 256	824 112	792 889	739 121	701 137	664 075	623 371	
55	817 077	830 990	835 919	834 179	820 356	926 671	914 182	898 335	869 948	849 410	825 821	797 279	745 235	716 113	682 449	644 195	592 818	
60	812 458	823 478	824 963	818 545	804 082	902 106	890 535	869 840	844 422	824 768	793 199	751 007	725 260	694 488	660 260	607 380	561 159	
65	807 647	814 928	814 254	802 762	785 486	879 506	863 337	835 092	818 323	791 871	753 206	727 773	700 212	666 784	609 398	576 549	541 560	
70	802 217	807 426	802 592	783 293	766 456	855 016	834 436	808 357	786 034	755 963	725 310	699 426	669 689	615 966	587 340	554 657	518 306	
75	796 675	798 895	789 765	768 405	742 452	829 975	798 383	779 635	753 320	718 760	695 225	662 591	617 677	591 624	562 359	528 304	473 452	
80	790 933	789 007	777 064	752 311	724 648	802 750	771 749	748 901	715 406	688 370	659 635	622 942	591 049	562 312	529 808	475 376	446 233	
85	785 029	779 754	764 305	735 963	707 111	775 148	741 755	714 732	679 602	653 601	620 943	586 146	560 011	530 338	478 793	452 322	423 315	
90	778 890	771 091	750 270	720 225	688 391	745 485	712 194	679 719	647 724	618 647	580 213	555 717	523 789	483 143	455 479	427 147	395 847	

MEGAWATIN AURINKOSÄHKÖJÄRJESTELMÄN VUODESSA TUOTTAMAN SÄHKÖN ARVO ERI ASENNUSKULMILLA LIITE 2

Vuodessa tuotetun		Kallistuskulma [°]																
sähkön arvo [€]		10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
A t s i m u u t i k u l m a	-90	27 756 €	27 301 €	26 604 €	25 672 €	24 628 €	26 117 €	25 050 €	23 715 €	22 637 €	21 124 €	20 088 €	18 883 €	17 391 €	16 249 €	15 200 €	13 955 €	11 970 €
	-85	27 994 €	27 618 €	27 046 €	26 245 €	25 291 €	27 035 €	26 077 €	24 757 €	23 769 €	22 616 €	21 232 €	20 148 €	18 791 €	17 141 €	16 107 €	14 949 €	13 676 €
	-80	28 210 €	27 955 €	27 510 €	26 824 €	25 945 €	28 066 €	27 079 €	26 016 €	24 847 €	23 796 €	22 506 €	21 308 €	20 232 €	18 632 €	16 942 €	15 795 €	14 579 €
	-75	28 432 €	28 266 €	27 935 €	27 397 €	26 585 €	29 035 €	28 067 €	27 165 €	25 897 €	24 945 €	23 779 €	22 232 €	21 196 €	20 099 €	18 845 €	16 717 €	15 428 €
	-70	28 654 €	28 566 €	28 362 €	27 926 €	27 228 €	29 949 €	28 964 €	28 173 €	27 165 €	26 050 €	24 979 €	23 662 €	22 100 €	20 970 €	19 779 €	18 450 €	16 352 €
	-65	28 886 €	28 858 €	28 770 €	28 440 €	27 812 €	30 805 €	29 943 €	29 141 €	28 247 €	27 055 €	26 077 €	25 074 €	23 640 €	21 851 €	20 647 €	19 330 €	17 883 €
	-60	29 093 €	29 187 €	29 168 €	28 944 €	28 435 €	31 613 €	30 983 €	30 045 €	29 243 €	28 248 €	26 914 €	25 955 €	24 837 €	23 593 €	21 576 €	20 182 €	18 718 €
	-55	29 282 €	29 493 €	29 531 €	29 435 €	29 053 €	32 394 €	31 868 €	31 080 €	30 255 €	29 344 €	28 162 €	26 754 €	25 673 €	24 458 €	23 111 €	21 185 €	19 572 €
	-50	29 484 €	29 774 €	29 904 €	29 883 €	29 647 €	33 084 €	32 683 €	32 057 €	31 080 €	30 308 €	29 402 €	28 042 €	26 479 €	25 281 €	23 943 €	22 468 €	20 529 €
	-45	29 666 €	30 045 €	30 246 €	30 323 €	30 151 €	33 876 €	33 401 €	32 871 €	32 101 €	31 061 €	30 212 €	29 158 €	27 932 €	26 060 €	24 698 €	23 216 €	21 635 €
	-40	29 838 €	30 299 €	30 593 €	30 736 €	30 670 €	34 649 €	34 112 €	33 626 €	32 976 €	32 072 €	30 932 €	29 919 €	28 733 €	27 422 €	25 651 €	23 943 €	22 336 €
	-35	29 981 €	30 522 €	30 898 €	31 100 €	31 119 €	35 270 €	34 916 €	34 336 €	33 760 €	32 971 €	31 897 €	30 562 €	29 427 €	28 162 €	26 682 €	24 938 €	22 991 €
	-30	30 120 €	30 747 €	31 205 €	31 467 €	31 531 €	35 836 €	35 572 €	35 069 €	34 395 €	33 700 €	32 794 €	31 667 €	30 149 €	28 775 €	27 299 €	25 746 €	23 987 €
	-25	30 261 €	30 930 €	31 446 €	31 767 €	31 914 €	36 310 €	36 134 €	35 747 €	35 098 €	34 282 €	33 428 €	32 368 €	31 125 €	29 567 €	27 883 €	26 314 €	24 559 €
	-20	30 358 €	31 090 €	31 648 €	32 051 €	32 239 €	36 730 €	36 599 €	36 255 €	35 690 €	34 939 €	33 899 €	32 875 €	31 693 €	30 311 €	28 697 €	26 812 €	24 995 €
	-15	30 446 €	31 247 €	31 818 €	32 261 €	32 493 €	37 127 €	37 025 €	36 703 €	36 188 €	35 481 €	34 552 €	33 355 €	32 134 €	30 787 €	29 204 €	27 541 €	25 545 €
	-10	30 515 €	31 356 €	31 965 €	32 432 €	32 704 €	37 400 €	37 369 €	37 108 €	36 655 €	35 960 €	35 035 €	33 947 €	32 634 €	31 107 €	29 585 €	27 915 €	26 060 €
	-5	30 573 €	31 437 €	32 103 €	32 588 €	32 862 €	37 623 €	37 616 €	37 379 €	36 932 €	36 286 €	35 448 €	34 385 €	33 124 €	31 650 €	29 965 €	28 154 €	26 274 €
	0	30 614 €	31 514 €	32 208 €	32 683 €	32 999 €	37 789 €	37 778 €	37 555 €	37 114 €	36 490 €	35 644 €	34 609 €	33 410 €	31 992 €	30 381 €	28 526 €	26 435 €
	5	30 631 €	31 559 €	32 257 €	32 740 €	33 023 €	37 841 €	37 838 €	37 618 €	37 181 €	36 557 €	35 716 €	34 694 €	33 472 €	32 073 €	30 463 €	28 620 €	26 503 €
	10	30 620 €	31 564 €	32 252 €	32 724 €	33 011 €	37 796 €	37 786 €	37 588 €	37 163 €	36 522 €	35 660 €	34 633 €	33 375 €	31 925 €	30 229 €	28 159 €	26 168 €
	15	30 610 €	31 530 €	32 223 €	32 678 €	32 964 €	37 681 €	37 680 €	37 450 €	36 996 €	36 323 €	35 437 €	34 367 €	33 034 €	31 153 €	29 499 €	27 866 €	26 102 €
	20	30 574 €	31 457 €	32 146 €	32 581 €	32 840 €	37 497 €	37 435 €	37 166 €	36 661 €	35 946 €	34 996 €	33 440 €	32 012 €	30 739 €	29 293 €	27 667 €	25 663 €
	25	30 521 €	31 367 €	32 015 €	32 426 €	32 678 €	37 199 €	37 079 €	36 758 €	36 185 €	35 044 €	33 762 €	32 838 €	31 705 €	30 437 €	28 970 €	26 914 €	25 021 €
	30	30 428 €	31 235 €	31 847 €	32 216 €	32 378 €	36 802 €	36 622 €	36 059 €	35 179 €	34 158 €	33 372 €	32 426 €	31 278 €	29 713 €	27 835 €	26 190 €	24 564 €
	35	30 327 €	31 090 €	31 624 €	31 949 €	32 037 €	36 269 €	35 860 €	35 155 €	34 282 €	33 665 €	32 843 €	31 821 €	30 057 €	28 578 €	27 220 €	25 719 €	23 965 €
	40	30 202 €	30 889 €	31 376 €	31 618 €	31 607 €	35 566 €	34 989 €	34 203 €	33 704 €	33 016 €	31 845 €	30 232 €	29 201 €	28 004 €	26 638 €	24 822 €	22 955 €
	45	30 062 €	30 689 €	31 097 €	31 210 €	31 046 €	34 663 €	34 023 €	33 539 €	32 937 €	31 895 €	30 497 €	29 587 €	28 520 €	27 316 €	25 469 €	23 564 €	22 091 €
	50	29 917 €	30 458 €	30 757 €	30 751 €	30 426 €	33 891 €	33 243 €	32 703 €	31 847 €	30 564 €	29 768 €	28 822 €	27 661 €	25 590 €	24 203 €	22 876 €	21 417 €
	55	29 753 €	30 190 €	30 314 €	30 215 €	29 713 €	32 920 €	32 380 €	31 699 €	30 566 €	29 749 €	28 849 €	27 758 €	25 740 €	24 678 €	23 460 €	22 085 €	20 189 €
	60	29 572 €	29 897 €	29 899 €	29 620 €	29 085 €	31 989 €	31 448 €	30 611 €	29 571 €	28 794 €	27 538 €	25 914 €	24 967 €	23 842 €	22 601 €	20 618 €	18 965 €
	65	29 386 €	29 570 €	29 496 €	29 022 €	28 368 €	31 109 €	30 415 €	29 244 €	28 555 €	27 487 €	25 989 €	25 034 €	24 013 €	22 804 €	20 623 €	19 455 €	18 227 €
	70	29 177 €	29 282 €	29 055 €	28 335 €	27 620 €	30 167 €	29 324 €	28 227 €	27 306 €	26 138 €	24 941 €	23 984 €	22 884 €	20 818 €	19 801 €	18 645 €	17 369 €
	75	28 964 €	28 959 €	28 572 €	27 775 €	26 705 €	29 245 €	27 922 €	27 131 €	26 088 €	24 722 €	23 828 €	22 559 €	20 862 €	19 930 €	18 887 €	17 685 €	15 683 €
	80	28 747 €	28 590 €	28 084 €	27 166 €	26 018 €	28 220 €	26 924 €	25 979 €	24 645 €	23 588 €	22 465 €	21 070 €	19 902 €	18 873 €	17 724 €	15 695 €	14 694 €
	85	28 527 €	28 248 €	27 615 €	26 540 €	25 349 €	27 197 €	25 794 €	24 725 €	23 312 €	22 294 €	21 062 €	19 737 €	18 806 €	17 742 €	15 792 €	14 886 €	13 898 €
	90	28 301 €	27 926 €	27 092 €	25 955 €	24 649 €	26 085 €	24 709 €	23 434 €	22 142 €	21 022 €	19 552 €	18 656 €	17 465 €	15 957 €	14 984 €	14 012 €	12 948 €